Aus dem Hygienischen Institut der Universität Würzburg
Vorstand: Prof. Dr. M. Knorr.

Über das lotrechte und waagerechte Vordringen von gelösten Stoffen und Mikroorganismen im Boden.

Inaugural-Dissertation

verfaßt und der

Hohen Medizinischen Fakultät

der

Julius-Maximilians-Universität Würzburg

zur Erlangung der Doktorwürde

vorgelegt von

Rudolf Muselmann

aus Gräfenthal/Thür.

1939

Buchdruckerei Richard Mayr, Würzburg.

Berichterstatter: Prof. Dr. M. Knorr.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Meinem lieben Vater
in Dankbarkeit gewidmet!

Inhaltsverzeichnis.

Seite

A. Schrifttum 1

B. Eigene Versuche 14

I. Lotrechte Filtration

1. Prüfung einer 3 m starken Mainsandschichte auf ihre Durchlässigkeit für Wasser, Kochsalz- und Fluoresceinlösung 16
2. Prüfung einer 2,4 m starken Mainsandschicht auf ihre Durchlässigkeit für Bakterien 20
3. Naturversuch im Gelände eines Wasserwerks über die Filtrationskraft des Bodenprofils 22
4. Laboratoriumsversuch über die Filtrationskraft bei einer den natürlichen Bodenverhältnissen von Versuch 3 entsprechenden Versuchsanordnung 24

II. Waagerechte Filtration

3. Versuche über das Vorrücken einer Warmwasserwelle in einem künstlich im Laboratorium erzeugten Grundwasserstrom 29/31
4. Prüfung des waagerechten Vordringens von Fluorescein und Kochsalz im künstlichen Grundwasserstrom bei Eingabe der Stoffe direkt in das Grundwasser 32
5. Das waagerechte Vordringen von Florescein und NaCl im Grundwasserstrom bei Aufgabe der Stoffe auf die das Grundwasser deckende Sandschicht 34
6. Prüfung der waagerechten Filtration eines Mainsandprofils für Bakterien, die in das Grundwasser gelangten 35

III. Versuche über lotrechte Filtration bei Porenvolumen = Wasservolumen 36

C. Zusammenfassung 39

A. Schrifttum.

Ein großer Teil atmosphärischer Niederschläge versickert allmählich im Erdreich, soweit er nicht der Verdunstung anheimfällt. Das auf die Oberfläche gelangte Wasser dringt Schicht um Schicht tiefer, bis es auf eine undurchlässige Lage stößt, sich auf dieser anstaut und so zum Grundwasser wird. Dieses befindet sich seinerseits in Bewegung, d. h. es bildet Grundwasserströme, die in mehr oder weniger waagerechter Richtung und je nach dem Gefälle und Bodenprofil in wechselnder Geschwindigkeit den Boden durchfließen. Das Wasser wird natürlich auf seinem Weg durch den Boden die Stoffe desselben mit sich führen, die wasserlöslich sind, andererseits Stoffe der Erdoberfläche, mit denen es in Berührung kam, in die Tiefe befördern. Das Wasser ist demnach Träger sowohl löslicher Stoffe als auch von Formbestandteilen, z. B. von Kleinlebewesen. Über dem Grundwasser bildet sich infolge der Kapillarität des Bodens eine wasserhaltige, seitlich nicht strömende sog. „Ansaugzone". Ausschlaggebend für ihren Wassergehalt ist die Größe der Bodenkapillaren, die wiederum abhängig ist von der Größe der Bodenkörner und der Festigkeit des Bodens. Ein feinporöser Boden wird durch die Kapillarkraft seiner Zwischenräume mehr Wasser in sich halten können als ein grobporöser Boden, der das Wasser leichter hindurchlaufen läßt.

Eine besondere Bedeutung erlangt die lotrechte sowie die waagerechte Wasserbewegung im Boden in jenen Gegenden, wo man das Grundwasser zur Trinkwasserversorgung heranzieht. Es ist nachgewiesen, daß Verunreinigungen verschiedenster Art von der Oberfläche unter gegebenen Bedingungen in die Grundwasserschicht gelangen können, dort verschleppt werden und so den Wert des Grundwassers bzw. Trinkwasser stark beeinträchtigen, wenn nicht gar das Wasser für Trinkzwecke unbrauchbar machen. Es sind selbst Epidemien auf solche Weise entstanden.

Es gibt viele Stellen im Gelände, wo Oberflächenwasser und Grundwasser in Wechselbeziehung zu einander stehen. Man denke nur an Flüsse und Seen, von denen besonders die letzteren oft weiter nichts sind als Grundwasser, das mit seinem Spiegel zutage tritt; und dementsprechend steigen und fallen solche Seen mit dem Spiegel des Grundwassers.

Andere Seen und Flüsse liegen höher als der Grundwasserspiegel, und es ist leicht verständlich, daß ein Teil ihres Wassers in das Grund-

wasser hinabsinken kann, wenn ihre Ufer und Böden nicht wasserdicht sind. Die meisten Seen und Flüsse sind annähernd wasserdicht durch die Schlammdecke, welche den Boden bildet. Es kann dann z. B. Grundwasser eintreten, aber Fluß- und Seewasser nicht austreten (Ventil-Theorie). Bei Flüssen mit starkem Gefälle und klüftigem Bett können sich die feinen Schlammteilchen nur schlecht setzen, sodaß manche Flußbette zeitweilig und streckenweise durchlässig sind und ihr Wasser dem Grundwasser zufließt.

Wenn ein Fluß ansteigt, so wird der Einstrom von Grundwasser in den Fluß, was oft der Fall ist, zunächst verhindert; das Grundwasser wird gestaut und eine Stauwelle läuft landeinwärts. Wenn das Grundwasser durch Pumpen in der Nähe nicht abgesaugt wird und der Anstieg des Flusses nicht zu schnell erfolgt, so wird im allgemeine keine erhebliche Menge des Flußwassers in das Grundwasser eindringen oder das eingedrungene wird bald wieder von dem flußwärtsdringenden Grundwasser in den Fluß zurückgedrückt. Zeigt der Fluß aber ein rasches Ansteigen und sind seine Ufer gut durchlässig, so werden reichlich Wassermengen austreten und sich dem Grundwasser so weit auflagern, bis die Höhendifferenz zwischen Fluß- und Grundwasser ausgeglichen ist. Steigt ein Fluß nun so weit an, daß er das Land überschwemmt, so werden natürlich außerdem große Wassermengen den Boden senkrecht durchfließen und zum Grundwasser gelangen können. Eine Ausnahme mögen die Böden bilden, die recht feinporig sind. Wenn hier die Überschwemmung sehr rasch kommt, so kann ein großer Teil der Luft aus den feinen Poren nicht entweichen, und es bilden sich zwischen unterem und oberem Wasser Luftkissen, die einen weiteren Zufluß von oben verhindern.

Wie schon erwähnt wurde, ist das von oben kommende Wasser für das Grundwasser nicht gleichgültig, wenn Brunnen in der Umgebung vorhanden sind.

Ein Einfluß kann sich in chemischer, physikalischer und bakteriologischer Hinsicht bemerkbar machen. Von weitaus größter Bedeutung ist der Einfluß in bakteriologischer Beziehung. Eine noch nicht geklärte Frage ist es, ob die bei einer Überschwemmung in einem Brunnen- oder Galleriewasser gefundenen Bakterien aus dem Fluß oder aus dem Boden stammen. Das mag auch von Fall zu Fall verschieden sein.

In diesem Zusammenhang sei in folgendem das Verhalten der Bakterien im Boden kurz besprochen. In den obersten Bodenschichten mit ihrer reichlichen Menge organischer Stoffe herrscht das reichste Leben. Neben Infusorien, Kleintieren und Kleinpflanzen finden sich vor allem Bakterien. In einem ccm Erde konnte man mehrere Hunderttausende bis Millionen feststellen.

Das weitere Vordringen der Lebewesen hängt natürlich von der Beschaffenheit des Bodens ab. In feinporigem Boden, wo die Bewegung

des Wassers von oben nach unten eine sehr langsame ist, werden viele Bakterien zurückgehalten. Schon in 10 bis 20 cm Tiefe ist ihre Zahl wesentlich vermindert. Statt der Millionen finden sich nur noch Hunderttausende, in einem Meter Tiefe vielleicht einige Tausende und in 3 bis 4 Meter Tiefe nur noch wenige oder keine. Wir müssen jedoch nach eigenen neuen Versuchen in Lehmgruben die Bodensterilität ab 3 bis 4 Meter erheblich in Zweifel ziehen. Bei steriler Entnahme waren noch in 6 Meter Tiefe massenhaft Keime nachweisbar, obwohl die überdeckenden Löß- und Lößlehmschichten zu den gut filtrierenden Bodenprofilen gehören. Die folgende Tabelle, die dem Buch Gärtners: „Hygiene des Wassers" entnommen ist, gibt die bisherige Anschauung wieder.

Bakteriengehalt der Bodenschichten und die Abnahme mit zunehmender Tiefe.

Fränkel, Finsterberg, Potsdam, 24. 4. 1886 oben humöser, dann reiner, diluvialer Sand	Zahl der in 1 ccm Boden enthalt Bakterien	Kümmel, Altona, Heideboden, d. Sand	Zahl der in 1 ccm Boden enthalt. Bakterien
Oberfläche	verflüss.	0,25 m	6442
0,5 m	70 000	0,5 m	7060
1,0 m	1 000	2,0 m	50
2,0 m	0	3,5 m	0
2,5 m	250	4,5 m	0
3,0 m	0	6,5 m	0
4,0 m	0		
4,5 m	100		
5,0 m	0		
Grundwasser	—		

Diese Erscheinung beruht vor allem auf dem langsamen Eindringen des Oberflächenwassers in die Erde. Hierbei wird ein Teil der Bakterien zurückgehalten, weil manche größer sind als die Poren. Da die meisten jedoch kleiner sind, werden sie nicht abfiltriert. Die Bakterien werden ferner durch Flächenattraktion an den Porenwandungen abgefangen, wo sie infolge der niedrigen Temperatur sowie an Mangel von guten Nährsubstanzen in ihrer Vermehrung behindert sind und allmählich absterben.

Die Beobachtung, daß sich in einer bakterienarmen Bodenschicht an einzelnen Stellen ein vermehrter Bakteriengehalt nachweisen ließ, ließ die Vermutung aufkommen, daß diese Erscheinung mit den Pflanzenwurzeln in Zusammenhang stehe, zumal sich ergeben hat, daß sich

in der Umgebung von Wurzelwerk ein besonders hoher Bakteriengehalt vorfand. An sich sind solche Mikroorganismen harmlos, und Gärtner behauptet, pathogene Keime können durch wachsende Pflanzenwurzeln nicht in die Tiere gelangen. Aber wie schon gesagt, alle diese Versuche beruhen auf unzulänglicher Methodik. Man hat früher nur mit einfachen Nährböden und aerob untersucht.

Sterben die Pflanzenwurzeln ab, dann bilden sich Kanäle und Hohlräume, die bis zum Grundwasser führen können und die aus den Dungstoffen stammenden Bakterien direkt bis ins Grundwasser zu leiten vermögen. Welche Bedeutung die Pflanzenwurzeln für die Durchlässigkeit der Böden haben können, wird klar, wenn man bedenkt, daß unsere Getreidearten eine Wurzeltiefe bis zu drei Meter aufweisen, daß z. B. Luzerne und Pappeln ihre Wurzeln bis in eine Tiefe von 10 Meter vortreiben und dadurch (bes. Luzerne) der Boden von sehr zahlreichen Fasern siebartig durchlöchert wird. Selbst Lehm- und Lößböden, die ein gutes Filter darstellen, werden auf diese Weise durchlässig gemacht.

Eine nicht unwesentliche Rolle für die Durchlässigkeit eines Bodens spielen die Regenwürmer. Sie gehen bis zu 2 Meter Tiefe und mehr und sind im Boden meist zahlreich vorhanden. Auch Maulwurfs- und Mäusegänge sind in Wiesen und Äckern oft recht zahlreich. Aus alldem geht hervor, daß Acker- und Wiesenboden oft von tief hinabreichenden Röhren stark durchsetzt ist und damit die Durchlässigkeit stark erhöht wird.

Wenn ein Grundwasserspiegel Schwankungen unterworfen ist, und bisweilen bis in bakterienhaltige Bodenschichten steigt, so wird auch in feinporigem Boden das Grundwasser zumindest in seinen oberen Bezirken mit Bakterien durchsetzt sein.

Ob nun Bakterien, welche in das Grundwasser gelangen, von demselben verschleppt werden, hängt vor allem von der Geschwindigkeit der mehr oder minder horizontalen Wasserbewegung ab. Beträgt diese nur einen Meter oder weniger am Tag, so werden die Bakterien durch Flächenattraktion und Sedimentation bald haften bleiben. Ist die Geschwindigkeit jedoch größer, so findet ein Transport in größerer Entfernung statt. In feinkörnigem Boden ist die Geschwindigkeit an sich gering, kann jedoch auch hier ansteigen, wenn ein starkes Gefälle vorhanden ist; dieses kann auch künstlich erzeugt werden durch die Absenkung eines Wasserspiegels in einem Brunnen. Wie bei starkem Absenken des Grundwasserspiegels bei gegebenen Verhältnissen auch von der Seite her die Bakterien herangeogen werden können, zeigt sehr eindrucksvoll folgender Versuch:

Dunbar ließ 11 Brunnen, die mit ihren Filteroberkanten 10,5 bis 15,5 m unter Erdgleiche lagen und 16 bis 32 m von einem Graben entfernt waren, der in einem ccm Wasser 1 bis 5 Millionen Bakterien enthielt, 7 Monate hindurch um einen Meter absenken; das Wasser

blieb keimfrei. Als die Absenkung auf 2 Meter erhöht wurde, stieg nach 14 Tagen der Keimgehalt auf 100 und erhob sich später auf 10 000. Der Boden bestand zu rd. 70% aus Sand von 0,2 bis 0,5 mm Durchmesser.

Andere Versuche über die Durchlässigkeit eines Bodens für Bakterien hat Lehmann angestellt. Er setzte auf den zu untersuchenden Boden im Gelände eines Wasserwerkes einen 4 m weiten Blechzylinder, der 80 cm tief eingegraben wurde, füllte ihn 50 cm hoch mit Wasser, dem eine Aufschwemmung von Bact. prodigiosum zugesetzt war. Der Wasserstau in dem Zylinder wurde durch dauernden Zulauf auf 50 cm Höhe gehalten. Das Wasserwerk wurde in Betrieb gesetzt und aus einem 3 Meter von der Eingabestelle entfernten Grundwassersammelschacht laufend Untersuchungsproben entnommen. Nach 4½ Stunden wurden die ersten Bakterien im Grundwasser festgestellt, bei einem weiteren Versuch, wo die Entnahmestelle in der Gallerie 60 Meter entfernt lag, bereits nach 1½ Stunden. Der Boden bestand in dem Gelände oben aus 30—50 cm Humus, dann folgte eine zwischen 0,5 und 2,5 Meter wechselnd starke Lehmschicht, unter der dann bis zum Grundwasserspiegel in 6 bis 7 Meter Tiefe Mainsand und Mainkies gelagert waren. — Im Verfolg seiner Arbeiten brachte Lehmann die Lehmerde in 10 cm weite Blechrohre von verschiedener Länge. Seitlich war ein aufwärtssteigendes Knie angebracht, in dem das zugeleitete Wasser in 2 Meter Stauhöhe gehalten wurde. Wurden in den Zulauf Bakterienaufschwemmungen gebracht, so waren bei 5 Meter Länge des Rohres nach 24 Stunden einzelne Keime im Ablauf festzustellen, bei 10 Meter Länge wurden keine mehr gefunden.

Diese auffallend gute Durchlässigkeit, wie man sie für lehmige Schichten niemals erwartet hätte, läßt vermuten, daß bei den Geländeversuchen die Durchlässigkeit an solchen Stellen geprüft wurde, wo die Lehmdecke entweder nur in sehr dünner Lage vorhanden war oder aber irgend welche Defekte aufwies, sodaß bei dem starken Überdruck der Schutz verloren ging. Die in den Blechrohren angestellten Versuche vermögen dies auch nicht auszuschließen, denn der eingebrachte Lehm brauchte nur infolge seiner Durchfeuchtung etwas zusammenzusinken, wobei sich dann zwischen Blechwand und Lehm feine Spalten bildeten, durch die das Wasser bei dem hohen Überdruck leicht seinen Weg fand.

Im folgenden soll nun die Rede davon sein, wie sich der Vorgang des Vordringens von Flüssigkeiten von oben nach unten genauer abspielt. Die ersten Untersuchungen auf diesem Gebiet stammen von Hofmann, deren Ergebnisse hier kurz wiedergegeben werden sollen.

Hofmann unterscheidet für das Wasser im Boden drei Zonen:

1. Die Verdunstungszone. Sie ist die oberste Bodenschicht, in der zahlreiche und intensive Feuchtigkeitsschwankungen vorkommen, je nachdem die Niederschlagsverhältnisse sind. Sie ist der Raum,

in dem nach vorhergehender Trockenheit der Regen eines halben oder selbst eines ganzen Jahres festgehalten werden kann, sodaß kein Tropfen in die unteren Schichten abfließt. Es ist jedoch auch möglich, daß für die Feuchtigkeit dieser Zone der Wassergehalt der unteren Schichten maßgebend ist, wenn nämlich in trockenen Zeiten das verdunstete Wasser durch kapillaren Aufstieg aus den unteren Schichten ersetzt wird, was natürlich vom Grade der Austrocknung einerseits und dem Stand des Grundwasser andererseits abhängt.

2. An die Verdunstungszone schließt sich nach unten an die Durchgangszone. In ihr kommt die Verdunstung nicht mehr zur Geltung. Sie hat einen konstanten reichlichen Wassergehalt, dessen Menge bestimmt ist von der Größe der Bodenkapillaren. Das Wasser stagniert hier vollkommen, so lange nicht ein Zufluß von oben erfolgt. Sofern dies der Fall ist, ändert sich allerdings der Wasserreichtum dieser Strecke vorübergehend, da das eindringende Wasser die Kapillaren je nach ihrer Größe rascher oder langsamer durchfließt, um nach dessen Abfließen wieder den vorherigen Wassergehalt anzunehmen. Um den unteren Schichten Wasser zu spenden, muß diese Zone vorher in einen völlig mit Wasser gesättigten Zustand versetzt sein, erst dann fließt der Überschuß weiter, und zwar wird gerade so viel Wasser aus dieser Zone unten abfließen, als auf ihre Oberfläche gelangt ist.

3. Nach unten geht die Durchgangszone in die des kapillaren Grundwasserstandes über. Sie reicht vom Grundwasserspiegel so hoch hinauf als die Größe der Zwischenräume, d. h. die Größe der Kapillarkraft ein Ansteigen des Wassers bedingt. In grobkörnigem Boden wird diese Zone niedriger sein als in feinkörnigem. Während sie in feinporösem Boden 1 bis 2 Meter Höhe erreichen kann, ist sie im grobporösen Boden oft nur einige cm stark.

Wenn das Grundwasser letzten Endes nur von atmosphären Niederschlägen herrührt und diese nur auf die Oberfläche fallen, so muß man annehmen, daß ein Steigen durch Abfluß aus den beiden oberen Zonen nach unten erfolgt und zwar in der Regel durch Verschiebung des im Boden vorhandenen Kapillarwassers. Hofmann beweist das durch Versuche mit Kochsalzlösungen, die er auf mit Sand gefüllte Röhren oben aufgoß. Er benutzte Blechrohre von 1 Meter Länge und 16,7 qcm Querschnitt. Der Boden derselben war durch ein feines Drahtgitter abgeschlossen. Zur Füllung wurde reiner weißer Sand (Quarzsand) benutzt. Rohr I enthielt eine gröbere Sorte von Korndurchmesser 0,5 bis 1,5 mm, Rohr II eine feinere Art von 0,3 bis 0,5 mm Durchmesser.

Beide Rohre wurden nun von oben solange mit dest. Wasser begossen, bis der Sand kein Wasser mehr halten konnte. Nachdem das überschüssige unten abgetropft war, wurde oben eine Na Cl-Lösung (50 ccm) aufgegeben, die in 100 ccm. 1,008 g Na Cl enthielt. In den folgenden Tagen wurde alle 24 Stunden die gleiche Menge (50 ccm) dest. Wasser nachgegossen, die abtropfenden Wassermengen gemessen

und der Na Cl-Gehalt bestimmt. — Nachdem das Kochsalz im Abfluß der beiden Röhren wieder verschwunden war, wurden nunmehr wieder auf den noch durchfeuchteten Boden je 50 ccm Kochsalzlösung aufgegeben und so ein Kontrollversuch unmittelbar angeschlossen. Folgende Tabelle zeigt das Untersuchungsergebnis:

Tag	Aufgegossen	Aus Sand I abgeflossen			Aus Sand II abgeflossen		
		Flüssigk. g	100 ccm Ausfluß = mg NaCl	Ausgespült NaCl mg	Flüssigk. g	100 ccm Ausfluß = mg NaCl	Ausgesp. NaCl-Mg. = mg
1	50 ccm mit NaCl 0,504 g	49,5	0	0	84,5	0	0
2	50 ccm dest. H_2O	47,1	51	24	46,0	0	0
3	„ „	44,8	402	180	48	0	0
4	„ „	47,8	243	116	47,5	0	0
5	„ „	50,2	171	86	50	0	0
6	„ „	45,6	162	71	47,7	143	69
7	„ „	49,2	45	22	48,9	402	197
8	„ „	48,4	12	6	45,4	357	162
9	„ „	48,3	7	3	46,7	147	68
10	„ „	47,4	2	1	46,4	11	5
11	„ „	47,6	0	0	46,5	0	0
12	50 ccm mit NaCl 0,504 g	44,9	0	0	42,8	0	0
13	50 ccm dest. H_2O	46,9	47	22	44,7	0	0
14	„ „	48,4	363	176	44,6	0	0
15	„ „	46,4	255	119	44,7	0	0
16	„ „	42,6	189	80	43,0	0	0
17	„ „	46,7	139	65	42,8	78	33
18	„ „	49,1	54	26	46,2	393	181
19	„ „	47,6	18	9	46,5	432	201
20	„ „	47,6	6	3	45,6	162	74
21	„ „	47,2	2	1	44,6	32	14
22	„ „	47,5	0	0	43,7	0	0

Demnach ergibt sich nach Hofmann:

daß Zuflüsse in einem grobporösen Boden sehr schnell in die Tiefe gelangen, wenn auch seine Zwischenräume mit Wasser gesättigt sind, falls eine Abflußmöglichkeit besteht.

In dem dichten Boden II erschien die Kochsalz im Ausfluß erst am 6. Tage, also 4 Tage später als im Boden I.

Die in dem Versuch mitgeteilten Beobachtung lehren ferner, daß die Verunreinigungen in einem grobporösen Boden trotz des raschen Eindringens auffallend lange nachhalten. In dem Boden I (grob) dauerte es 9 Tage, bis alles Na Cl ausgeschwemmt war, in dem feinen Boden II dauerte es nur 5 Tage. Hofmann erklärt dies durch die ungleiche Wirkungsweise der Kapillaren. „Offenbar hat man in jedem grobporösen Boden zwei Systeme von Zwischenräumen, welche die Fortbewegung von Flüssigkeiten und darin verteilten Stoffen in direkt entgegengesetztem Sinn beeinflussen.“ In einem grobporösen Boden finden sich einmal die weiten Zwischenräume, offene Kanäle, mit geringem Reibungswiderstand, welche Flüssigkeiten rasch durchfließen lassen. Daneben sind aber in jeden grobporösen Boden feinere Kapillaren in Form von Röhren und ganz feinen Flächespalten vorhanden, erzeugt durch alle Berührungsstellen von Steinchen und Körnchen. In diesem Kapillarsystem werden die Stoffe lange zurückgehalten, weil sie den Hauptwegen der einsinkenden Flüssigkeit entrückt sind und nur langsam wieder durch Diffusion ausgespült werden. Infolge einer solchen zweiseitigen Wirkung kommt es, daß Verunreinigungen einen grobporösen Boden zwar schnell durchsetzen, dann aber lange in ihm enthalten sind.

Das Rohr I enthielt 182 g Kapillarwasser, das Rohr II mit feinerem Sand 309 g. Da die aufgegebene Kochsalzmenge nur 50 ccm mit 0,504 g Na Cl betrug, kamen diese im ersten Fall zu 3,6mal soviel Wasser und es hätte so die Salzlösung in dem wasserreichen Boden II eine größere Verdünnung erfahren müssen als in I, um so mehr, als täglich wieder 50 g dest. Wasser aufgegeben wurden. Doch ist dies nicht der Fall, wie die Konzentrationen im Abfluß lehren. Der Sandboden II, der doppelt soviel Kapillarwasser enthielt, macht die eindringende Verunreinigung nicht verdünnter als Boden I, im Gegenteil war sie in II konzentrierter. Hätten sich die 50 ccm Salzlösung mit den 182 bzw. 309 g Kapillarwasser gemischt, so wäre unten eine Lösung zum Abfluß gekommen, welche bei I 217 mg NaCl% und bei II 140 mg% enthalten hätte. Statt dessen waren die Konzentrationen – wie die Tabelle zeigt — weit höher, das heißt, der Wasserreichtum im Boden übt keinen entsprechenden Einfluß auf die Verdünnung der von oben eindringenden Verunreinigungen aus.

2. Wenn ein feinporöser Boden mit Wasser vollkommen durchtränkt ist, gesättigt ist, so steht die Flüssigkeit in den Kapillaren in einem Gleichgewichtszustand, in einem allseitigen Spannungsverhältnis. Wird auf die Oberfläche eines solchen Bodens nun Wasser gegeben, so bewirkt der Überdruck von der Oberfläche her eine Störung des Gleichgewichts in den oberen Kapillaren und verdrängt das in ihnen stehende Wasser. Der Überdruck pflanzt sich nach unten fort und das Ergeb-

ist, daß am Boden der Erdschicht genau soviel Wasser abtropft wie oben zutropft.

Der Versuch mit dem feinkörnigen Sand hat nun gezeigt, daß sich das eingebrachte Kochsalz auffallend wenig mit dem vorhandenen Bodenwasser mischt. Es ist dies nur so zu erklären, daß die NaCl-Lösung das reine Wasser vor sich herdrückt, indem sie selbst durch das weiter von oben nachdringende Wasser Schichte um Schichte tiefer geschoben wird.

Es ist also möglich, daß in feinkörnigem Boden bei Flüssigkeitszufuhr von oben dem Grundwasser Flüssigkeiten beigemischt werden, die ganz anders beschaffen sind als die gleichzeitig oben aufgegebenen.

„In feinporösem Boden, dessen Poren derart sind, daß sämtliche kapillar wirken, finden eindringende Verunreinigungen eine beschränkte Verbreitung. Sie gelangen nur langsam Schichte um Schichte tiefer, und zwar jedesmal um die Wegstrecke, in welcher sie durch das von oben nachdringende Wasser fortgeschoben werden."

3. Hofmann bestimmte zunächst von seinen beiden Versuchsböden die Filtrationsgeschwindigkeit. Er ließ oben auf die Röhren gerade soviel Wasser in einem konstanten Strom aufffließen, daß die einzelnen Körner eben mit Wasser bedeckt blieben, sodaß unten immer die gleiche Menge abfloß. Auf einen Quadratmeter Fläche und einen Meter Bodentiefe berechnet, erhielt er folgende Ergebnisse für die Filtrationsgeschwindigkeit:

	= Sand I	= Sand II
In einer Stunde	1323 Liter;	168,6 Liter
In 24 Stunden	31752 Liter;	4046,0 Liter

Die Durchlässigkeit war also ziemlich bedeutend. Da nun ein Liter auf einen qm einem Niederschlag von 1 mm Höhe entspricht, so bedeuten die 31752 Liter Wasser in 24 Stunden die an sich unmögliche Regenmenge von 31752 mm = 31,7 m Regenhöhe; für den feinkörnigen Sand 4042 Liter = 4,0 m Regenhöhe.

Der feinporöse Boden wäre also imstande, an einem einzigen Tage 4042 Liter Regenwasser pro qm durchlaufen zu lassen.

Es ist erstaunlich, wie gut durchlässig der feine Boden Hofmanns ist, was aber nicht dazu verleiten darf, irgendwelche Schlüsse daraus auf die Verhältnisse in der Natur zu ziehen. Niederschläge von 30 mm (= 30 ccm Wasser) kommen ebenfalls nicht oft vor, vor allem nicht in so regelmäßiger und kurzer Folge wie in den Versuchen Hofmanns. Selbst bei dem grobporösen Bodenrohr, wo die 50 ccm NaCl-Lösung einer Verunreinigung von 30 Liter auf den qm darstellen würden, gelangen diese noch nicht gleich in 1 m Tiefe, sondern erst dann, wenn an dem folgenden Tag nochmals 30 Liter dazukommen würden. Im feinporösen Boden II waren sogar 6 Tage mit 50 ccm Wasserzugabe notwendig, um Kochsalz einen Meter tief zu befördern.

Die Annahme also, daß eine einmalige flüssige Verunreinigung der Bodenfläche rasch zur Infektion des Grund- und Brunnenwassers führen müsse, ist für den feinporösen Boden keineswegs zulässig.

Die Versuche mit feinporösem Boden lehren, daß wasserlösliche Verunreinigungen nur in der Wegstrecke und dem Zeitmaß tiefer treten als das im Boden schon vorhandene Wasser von oben her verdrängt wird, oder anders gesagt, der zeitliche Vorgang des Eindringens in feinporösem Boden hängt ab von der absoluten Menge des in ihm kapillar vorhandenen Wassers.

„Es wird sich so aus der im Boden (dichten) vorhandenen Wassermenge und dem Regenquantum wenigstens annähernd berechnen lassen, in welcher Zeit und wie tief Stoffe in den Boden vorgedrungen sein können."

Versuche über das seitliche Vordringen von Verunreinigungen im Boden wurden von Bail und Breinl angestellt. Die Autoren wurden zu ihren Versuchen angeregt durch einen Fall von Brunnenverunreinigung, die nur durch eine seit kurzem in Betrieb genommene und undicht gewordene Senkgrube zu erklären war. Die undichte Stelle wurde im oberen Drittel der Grube gefunden, und doch konnten irgendwelche Zeichen einer Verunreinigung des Bodens schon in geringer Entfernung von der Grubenwand nicht festgestellt werden. Das Grundwasser aber, welches sich ca. 3 m unter dem Grubenboden befand, war durch den Grubeninhalt verunreinigt.

Die Autoren hatten die Vorstellung, daß der Weg des Vordringens einer austretenden Verunreinigung durch mehrere Faktoren bedingt sei. Zunächst wird sich die austretende Flüssigkeit in Richtung des auf sie ausgeübten Druckes fortbewegen, dessen Größe abhängig ist von der Höhe des Grubeninhaltes über der Lücke. Außerdem macht sich die Schwerkraft geltend, indem sie die Wasserteilchen nach abwärts zu ziehen sucht und schließlich ist die kapillare Wirkung noch zu berücksichtigen. Nach einer gewissen Entfernung von der Austrittstelle wird natürlich die treibende Kraft ihre Wirkung verloren haben und die Flüssigkeit nur noch unter der Wirkung der Schwerkraft und der Kapillarität stehen.

Bail und Breinl benutzten zu ihren Versuchen große Zylinder aus oerziaktem Eisenblech von 40 cm Länge und 31 cm Durchmesser. Beide Enden waren durch Blechplatten verschließbar, und eine von diesen trug in der Mitte einen Tubus zum Ablauf des Wassers. Am Boden der waagerecht liegenden Röhre befanden sich 10 cm und 20 cm von der Vorderwand entfernt zwei Tubusse zum Ablauf des Wassers. Der Einlauf erfolgte durch den an der Vorderwand befindlichen Tubus mit Hilfe eines bis auf eine kapillare Öffnung zugeschmolzenen Glasrohres; diesem war eine Vorlageflasche vorgeschaltet, in der die Flüssigkeit ständig auf gleicher Höhe gehalten wurde. Der Apparat wurde

mit einem mäßig lehmigen Sand gefüllt (Korngröße unter 1,5 mm mit etwa 30% Feinerde). Der Einlauf von physiol. Kochsalzlösung, die mit einer Prodigiosus-Aufschwemmung versetzt war, erfolgte anfangs mit einer Flüssigkeitshöhe von 5 mm, die später auf 20 mm konstant gehalten wurde. Nach 8 Stunden waren 4600 ccm Wasser eingelaufen, bei einem späteren Versuch 11 200 ccm, von denen 5740 ccm wieder aus den Tubussen abtropften. Bei Herausnehmen des Bodens zeigt sich, daß dieser in den unteren Teilen ganz mit Wasser gefüllt war, darüber feucht und ganz oben trocken geblieben war. Die Grenze von feucht zu trocken verlief im Querschnitt halbmondförmig (nach oben konvex). Im Längsschnitt würde die Durchfeuchtung durch eine Kurve bezeichnend sein, deren Scheitel etwas oberhalb des Einlaufes liegt und die sich gleichmäßig nach hinten und unten absenkt. Die Bakterienzahl betrug in 1 ccm der Einlaufflüssigkeit ca. 4 Millionen, im abtropfenden Wasser zwischen 40 000 und 16 000. Bei der Untersuchung der Bodenproben ergab sich, daß die Zahl der Bakterien in der Mitte und unten größer war als seitlich und oben. Die Bakterienzahl wurde in der Weise bestimmt, daß 1 g Boden in 20 ccm steriler Kochsalzlösung eingegeben wurde. 0,05 ccm der durch intensives Schütteln hergestellten Aufschwemmung wurde dann über eine Agarplatte gegossen. Die Untersuchung von Wasser- und Bakteriengehalt in einem durch die Mitte des Apparates gelegten Längsschnitt ergab:

Oben (trocken erscheinend	7,27% (0)	5,53% (0)	4,66% (0)
Mitte (Einlauf)	14,45% (81000)	16,32% (4200)	14,2 % (3680)
Unten (schlammig, naß)	19,26% (14000)	18,88% (12900)	18,87% (11000)

Im Querschnitt:

10 cm vom Einlauf			20 cm vom Einlauf		
	7,27% (0)			5,35% (0)	
14,1% (2680)	14,45% (81000)	16,2% (9300)	14,2% (2400)	16,32% (4200)	13,95% (1956)
	19,26% (14000)			18,88% (12900)	

Es ist ersichtlich und auch verständlich, daß sich dort die meisten Keime fanden, wo die Flüssigkeit in der Hauptsache ihren Weg genommen hatte, bzw. wo die größte Feuchtigkeit herrschte, also in der Mitte und dann am Boden.

Ihre weiteren Versuche stellten die Autoren in einem größeren, viereckigen Kasten aus Eisenblech an, dessen Maße 1 m Länge, 70 cm Höhe und 72 cm Breite betrugen. An der Vorderwand befanden sich mehrere Tubusse übereinander, sodaß die Flüssigkeit in verschiedener

Höhe eingelassen werden konnte. Desgleichen besaß die Unterfläche mehrere Ausflußlöcher. Um einen gleichmäßigen Ablauf zu erzielen, lag über diesen ein Drahtsieb, um ein Durchlaufen der Erde zu vermeiden. Die eine Seitenwand bestand aus Glas, um den Verlauf der Flüssigkeit beobachten zu können. Die Flüssigkeit in der Vorlage wurde 55 mm hoch gehalten und trat durch den obersten Einlauf ein. Die Oberfläche der Erde lag etwa 4 cm über dem Einlauf. Der Versuch, der 4 Tage hindurch fortgesetzt wurde, ergab im wesentlichen das gleiche Ergebnis wie der frühere. Durch die Glaswand konnte beobachtet werden, wie sich die Flüssigkeit im Sand ausbreitete. Die Grenze zum Trockenen stellte sich wieder als eine nach hinten und unten geneigte Linie dar. Auch die Oberfläche des Sandes erwies sich als feucht in Form eines Halbkreises, dessen Basis an der Einlaufwand lag und 30 cm Durchmesser betrug und am Schluß des Versuches mit seiner weitesten Stelle 18 cm nach hinten reichte. Beim Herausnehmen der Hinterwand fiel die trocken gebliebene Erde heraus, während der feuchte Boden zusammenhängend stehen blieb. Die feuchte Erde bildete ungefähr einen abgestutzten Kegel, der durch die Einlaufwand halbiert wurde, seine obere abgestutzte Fläche wurde durch den nassen Fleck an der Oberfläche gebildet, der an der Einlaufwand 30 cm betrug, also die Seitenwände noch lange nicht berührte. Diese wurden an der Einlaufwand erst 14 bzw. 16 cm unter der Erdoberfläche erreicht, also in der Höhe des durch das Glas sichtbaren nassen Fleckes. Wie beim früheren Versuch war die Feuchtigkeit in der Mitte, also dem Einlauftubus entsprechend, weiter als an den Seiten vorgedrungen, am Boden 53 cm. Der bakteriologische Befund entsprach im wesentlichen dem des früheren Versuches.

Einen weiteren Versuch machten die Autoren mit einem sehr dichten und schweren Lehm, der wenig Sand enthielt. Während einer 5-tägigen Dauer liefen äußerst langsam im Ganzen 6030 ccm Flüssigkeit ein, beim Herausnehmen der Erde wurde festgestellt, daß die Nässe in der Höhe des Einlaufs am weitesten vorgedrungen war. Sie bildete einen Bogen, der der Einlaufwand in einer Strecke von 52 cm aufsaß, nirgends die Seitenwände erreichte und nach hinten auf 30 cm vorgeschoben war. Die Verunreinigung saß also der Einlaufwand an, wie ein Baumschwamm dem Baumstamm.

Aus den angestellten Versuchen ist zu entnehmen, daß die seitliche Ausbreitung keine allzu bedeutende ist. Daß diese von der Höhe des Druckes, unter dem die Flüssigkeit in den Boden gelangt und andererseits von der Beschaffenheit des Bodens selbst abhängt, ist ganz einleuchtend. Weiter nach unten hin nimmt die horizontale Verbreiterung zwar noch etwas zu, doch ist sie am Boden des Apparates im vorletzten Versuch nicht viel über einen halben Meter vorgedrungen, und man kann wohl annehmen, daß bei noch längerem Fortsetzen keine weitere horizontale Ausbreitung zustandekommt, außer einer gewissen Kapil-

larwirkung. Sehr deutlich zeigen die Versuch aber, die große Verbreitung der Verunreinigungsfläche nach unten. Obwohl die Einmündung nur kapillär war, fand sich etwa einen halben Meter tiefer ein ungefährer Halbkreis von 50 cm Durchmesser. Die Gefahr liegt nach Bail und Breinel also weniger in der rein seitlichen Verunreinigung als in der unverhältnismäßigen Ausbreitung derselben in die tieferen Bodenschichten.

Dem können wir uns nicht anschließen. Die seitliche Ausbreitung muß umso größer sein je feinporiger der Boden ist, damit erhöht sich seine Filtration bzw. zurückhaltende Kraft.

B. Eigene Versuche.

I. Die lotrechte Filtration.

Zunächst seien die Versuche über lotrechte Filtration geschildert. Es wurden dazu lange Glasröhren benutzt, die senkrecht aufgestellt und von oben her mit Sand bzw. Erde aufgefüllt wurden. Der Durchmesser der Röhren betrug 10 cm, wovon 5 mm auf die Dicke der Glaswand entfielen, sodaß der Innendurchmesser noch 9 cm betrug. Die Länge der Glasröhren war bei den einzelnen Versuchen verschieden.

Bei den ersten Versuchen wurde reiner Mainsand benützt, dessen Korngrößen, Körnervolumen, Porenvolumen, Feuchtigkeit und wasserhaltende Kraft bestimmt wurden.

Die Korngrößen wurden mittels Knoop'schen Siebsatzes festgestellt, indem 1000 g des Sandes durch die Siebe geschüttelt wurden und die in den einzelnen Sieben zurückgebliebenen Mengen gewogen wurden. Folgende Tabelle zeigt das Ergebnis:

mm	g	%
über 6	83	8,3
4 —6	118	11,8
2 —4	219	21,9
1 —2	180	18,0
0,6—1	348	34,8
0,5—0,6	34	3,4
unter 0,5	18	1,8
	1000	100,0

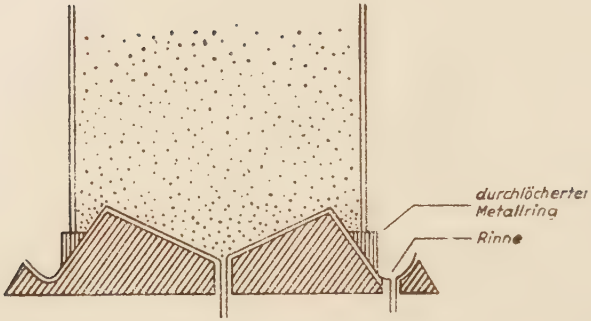
Die Bestimmung des Körnervolumens und Porenvolumens wurde so vorgenommen, daß in einem Meßzylinder 500 ccm des getrockneten Sandes (= 900 g) gegeben wurden und aus einem zweiten Zylinder solange ganz langsam Wasser zufließen lassen, bis das Wasser in dem Sandzylinder zur Marke 500 aufgestiegen war und dabei alle Luft aus dem Sand verdrängt hatte. Die verbrauchte Wassermenge betrug 175 ccm, das ist = 35% für das Porenvolumen, somit bleiben 65% für das Körnervolumen.

Vor dem Einfüllen des Mainsandes in die Glasröhren wurde er auf dem Boden ausgebreitet und an der Luft getrocknet. Dieser getrocknete Sand besaß dann noch eine Feuchtigkeit von 0,3%, was so ermittelt wurde, daß 1000 g des getrockneten Sandes 24 Stunden lang in einem Heißlufttrockenschrank bei 100° belassen wurden und danach der Gewichtsverlust festgestellt wurde.

Die Fähigkeit des Sandes, ihm zugeführtes Wasser bis zu einer gewissen Menge in seinen Poren zurückzuhalten, kann man als wasserhaltende Kraft bezeichnen. Sie wurde geprüft, indem eine gewisse Menge des Sandes (1000 g) in einen Glastrichter gefüllt wurden, welcher vorher mit feuchtem Filtrierpapier ausgelegt war. Sodann wurde aus einem Meßzylinder solange tropfenweise Wasser auf den Sand gegeben, bis er vollkommen durchfeuchtet war und aus dem Trichterrohr soviel Wasser abfloß wie man oben zugab. Nachdem die Zufuhr unterbrochen und kein Wasser mehr aus dem Trichter abtropfte, konnte man aus der verbrauchten und abgetropften Menge schließen, wieviel Wasser der Sand in seinen Poren festgehalten hatte. In vorliegendem Fall waren es 100 g, in einem weiteren Versuch, wo nur 250 g verwendet wurden, blieben 25 g Wasser im Sand. Für den verwendeten Mainsand kann man also sagen, daß er gerade 10% seines Eigengewichtes an Wasesr in seinen Poren festzuhalten und 35% zu speichern vermag.

Bevor mit den eigentlichen Filtrationsversuchen begonnen wurde, war noch die Frage zu klären, ob das auf die mit Sand gefüllten Röhren oben aufgegebene Wasser den Sand in allen Schichten gleichmäßig durchfließen wird, oder etwa vorwiegend an der Glasinnenwand seinen Weg nimmt. Diese Ansicht vertritt Braun, der ähnliche Versuche mit Glasröhren gemacht hat. Allerdings benutzte er Glasröhren, die viel kleiner waren, deren größte einen Durchmesser von nur 4 cm besaß. Es ist klar, daß in jenen Fällen, wo so enge Röhren benutzt wurden, das Wasser viel mehr mit der Innenwand des Glases in Berührung kommt, und an ihr abfließen kann, da ja die Oberfläche in den engen Röhren im Vergleich zum Rauminhalt sehr groß ist.

Um diese Unklarheiten zu beseitigen, wurde der Boden der Röhre, auf dem diese mit ihrem Sandinhalt ruht, so geschaffen, daß es möglich war, das im Inneren der Sandsäule herabfließende und das allenfalls an der inneren Glaswand herabfließende Wasser gesondert aufzufangen. Der Boden der Röhre bestand aus einer Messingplatte, die trichterförmig gestaltet war und nur eine 1 cm breite Randzone vom Trichterrand bis zur Glaswand freiließ (s. Abb.). Das außerhalb des Trichterrandes herabfließende Wasser konnte durch den durchlöcherten Metallring, auf dem die Röhre ruhte, hindurchfließen und sich in der Rinne sammeln, während das in den inneren Zonen des Sandes herablaufende Wasser vom Trichter aufgefangen wurde. Das Ganze war mit Holz unterbaut.



1. Versuch:

Versuchsanordnung: Länge der Glasröhre 3,04 m, Durchmesser 9 cm, mit Mainsand aufgefüllt bis 3 m. Aufgegeben wurden 190 ccm Leitungswasser tropfenweise innerhalb einer halben Stunde. Das entspricht einem sehr starken Gewitterregen von 30 mm Niederschlagshöhe.

Verlauf: Am 9. 10. 37 um 10^{20} wurde der Versuch mit der Aufgabe von 190 ccm Wasser begonnen. Die oberste Sandschicht bis 5 cm Tiefe benetzte sich sehr bald ringsum gleichmäßig mit Wasser.

Um 10^{35} wird in einer Tiefe von 55 cm (von der Sandoberfläche ab gemessen) ein feuchter, 5-Markstückgroßer Fleck sichtbar, an den sich bald nach unten weitere anschließen.

10^{50} beträgt die Tiefe des Wassers 1,30 m. Die feuchten Stellen im Sand laufen teils in waagerechter Richtung, streifenförmig, zirkulär, meist sind sie untereinander durch schmälere feuchte Stellen verbunden.

13.00	tiefste	feuchte	Stelle	bei	1,85 m
16.00	„	„	„	„	2,00 m
20.00	„	„	„	„	2,10 m
10./X. 10.20	„	„	„	„	2,25 m
11./X. 10.20	„	„	„	„	2,25 m

Das Wasser hatte also anfänglich den Sand ziemlich rasch, dann immer langsamer durchflossen, bis es schließlich bei 2,25 m stehen blieb.

Am 11. X. um 12.00 wird der Versuch mit der Aufgabe von abermals 190 ccm Wasser fortgeführt. Neben den alten feuchten Stellen im Sand bilden sich nur wenig neue, die alten nehmen langsam an Größe zu.

	16.00	unterste	feuchte	Stelle	bei 2,40 m
	16.50	„	„	„	„ 2,76 m
	20.00	„	„	„	„ 2,90 m
12. X.	9.00	„	„	„	„ 2.90 m
	12.00	„	„	„	„ 2,90 m

Da nicht zu erwarten ist, daß das Wasser nach so langem Stillstand tiefer fließen wird, werden abermals 190 ccm Wasser aufgegossen (12.00).

15.00 unterste feuchte Stelle bei 2,95 m
16.30 „ „ „ „ 2,95 m
17.00 das Wasesr hat den Boden der Röhre erreicht, es tropft jedoch nichts ab.

Am folgenden Tag ist ebenfalls noch kein Wasser aus der Röhre abgeflossen. Die Kapillarkraft des Sandes, die das Wasser zurückhält, ist also stärker als die Schwerkraft des Wassers.

Zur Fortsetzung des Versuches wurde nun nicht wie bisher Wasser auf den Sand gegossen, sondern eine Lösung von Kochsalz und Fluorescein. Dieses Na Cl-Fluorescein-Gemisch hatte eine Konzentration von 1% Na Cl (= 65,32 mg/l Cl') und 0,01 mg/l Fluorescein.

Am 15. 10. um 9.30 wurden 190 ccm der genannten Lösung innerhalb einer halben Stunde aufgegeben. 10.30 konnte der erste neu hinzugekommene nasse Fleck im Sand in 1 m Tiefe festgestellt werden. Der weitere Verlauf des Wassers bzw. der Lösung war jedoch nicht zu verfolgen, da sich neben den bereits vorhandenen feuchten Stellen im Sand keine neuen bildeten und die alten nur sehr langsam an Größe zunahmen.

Um 18.00 tropften die ersten Wassermengen aus dem zentralen Trichterröhrchen am Boden der Röhre ab. Ungefähr eine Stunde später begann das Wasser auch aus der Rinne zu fließen. Dies erklärt sich damit, daß sich hier das Wasser erst etwas sammeln muß, bis es abtropfen kann, während es in dem Trichter zusammengefaßt wird.

Die experimentelle Prüfung ergab die Übereinstimmung mit der Berechnung: z. B.

Auf eine 50 cm hohe Sandsäule normalfeuchten (<1%) wurden 300 ccm Wasser langsam aufgegeben, davon erschienen am Abfluß innerhalb von 15 Stunden

118 ccm aus dem zentralen Trichter,
43 ccm aus der Rinne (Randzone).

Bei einem Röhrendurchmesser von 9 cm beträgt die Fläche des Querschnittes 63,58 qcm, die Fläche des inneren Trichters bei r = 3,5 38,7 qcm. Demnach bleiben für die Randzonenfläche noch 24,88 qcm.

Es verhalten sich also 63,58 qcm zu 24, 88 qcm wie 118 ccm zu 43 ccm, also rd. *wie 3 : 1.*

Die Behauptung also, daß das Wasser an der Innenwand des Glases schneller herabfließe, kann nach dieser Beobachtung nicht aufrecht erhalten werden. Aus der Rinne tropfe nicht mehr Wasesr ab als aus dem Trichterrohr, ebenso ließen die anfänglich isoliert im Sand auftretenden nassen Flecken erkennen, daß das Wasser den Weg an der inneren Glaswand keineswegs bevorzugt.

Die stündlich abgetropften Wassermengen wurden in Reagenzgläsern aufgefangen und auf ihren Gehalt an Na Cl und Fluorescein untersucht:

Zeit	ccm	mg/l Cl'	mg/l Fluoresc.
(15. X.)			
18.00—19.00	5	284	0,005
19.00—20.00	5	284	0,005
20.00—21.00	5	426	0,005
21.00—22.00	5	426	0,005
22.00—23.00	5	568	0,005
23.00— 9.30	35	568	0,005
9.30—15.00	5	568	0,005
15.00—10.30	5	568	0,005
10.30—10.30	1	568	0,005
(18. X.)			
	71		

Weiteres Wasser floß nicht mehr ab.

Um den weiteren Verlauf der Konzentration für Na Cl und Fluorescein zu beobachten, wurden 190 ccm aqua dest. innerhalb einer halben Stunde aufgegeben (21. X., 9.15).

Nach 11 Stunden (20.15) begann das Wasser wieder abzutropfen.

Zeit	ccm	mg/l Cl'	mg/l Fluoresc.
20.15—21.30	3,4	996	0,005
21.30—22.00	3,4	996	0,005
22.00—22.30	3,4	994	0,005
22.30—23.00	3,4	994	0,004
23.00—23.30	3,4	1136	0,004
23.30—24.00	3,4	994	0,004
24.00— 9.00	28,0	994	0,004
9.15—11.00	4,0	1278	0,003
11.00—12.00	3,0	1420	0,003

Zeit	ccm	mg/l Cl'	mg/l Fluoresc.
12.00—13.30	3,0	1420	0,002
13.30—15.00	3,0	1542	0,002
15.00—18.00	3,0	1704	0,002
18.00—10.30	8,0	1775	0.002
10.30—10.30 (24. X.)	4.0	1775	0.002

26. X. 8.00 Aufgabe von weiteren 190 ccm aqua dest. in einer halben Stunde:

Zeit	ccm	mg/l Cl'	mg/l Fluoresc.
21.00— 9.00 (27. X.)	46.0	1846	0,002
9.00—11.30	5,0	1846	0,002
11.30—15.00	7,0	1740	0,002
15.00—17.00	3,0	1562	0,002
	61,0		

Weiteres Wasser floß nicht ab.

18.30 Uhr Aufgabe von 190 ccm aqua dest.

19.00—21.30	6,0	1740	0,002
21.30— 6.00	55.0	1846	0,002
6.00— 9.00	16.0	1562	0,002
9.00—10 00	5,0	1704	0,002
10.00—12.30	16,0	1562	0,005
12.30—15.30	15,0	1704	0,004
15.30—18.00	10,0	1562	0,002

18.00 Uhr Aufgabe von 190 ccm aqua dest. in einer halben Stunde:

18.00—23.00	15,0	1704	0,003
23.00— 9.30	88,0	1258	0,002
9.30—11.00	13,0	1258	0,002
11.00—12.00	9,0	1136	0,002
12.30—15.00	13,0	1136	0,002
15.00—18.00 (29. X.)	9,0	1136	0.002
	270,0		

Die Untersuchung der einzelnen Wassermengen zeigte also:

1. Daß Kochsalz und Fluorescein in dem anfänglich abgetropften Wasser gleichzeitig enthalten waren, also keine Trennung der eingegebenen Na Cl-Fluorescein-Mischung beim Durchfließen des Profils eingetreten war.

2. Daß die Konzentration für Na Cl anfangs 4,3% von der Stammlösung betrug, in 12 Tagen ihren Höhepunkt erreichte, was 28% NaCl von der Stammlösung entsprach. Der Abfall der Konzentration erfolgte ebenso gleichmäßig, jedoch langsamer als der Anstieg.

3. Daß der Fluoresceingehalt der Anfangsentnahme um 50% geringer war als der der Stammlösung; es war also im Verhältnis zu Kochsalz weniger zurückgehalten worden. Die Konzentration für Fluorescein stieg auch nicht weiter an wie bei Na Cl, sondern sank immer weiter ab.

2. Versuch:

Benutzt wurde eine Glasröhre von 2,50 m Länge und einem Innendurchmesser von 9 cm. Die Röhre war bis zur Höhe 2,40 m mit Mainsand gefüllt, der noch durch einen vorangegangenen Versuch, welcher zur Beobachtung des Wasserverlaufes im Sande angestellt wurde, angefeuchtet war. Es waren dabei 3 × 190 ccm Wasser aufgegeben worden.

Verlauf: Am 7.11.37 um 9.30 Uhr wurde eine Aufschwemmung von Bact. prodigiosum, die gleichzeitig Fluorescein enthielt, aufgegeben, und zwar 190 ccm (= 30 mm Niederschlagshöhe) tropfenweise innerhalb einer halben Stunde.

10.30 Uhr sichtbare Tiefe des Wassers bei 1,25 m
11.30 „ „ „ „ „ „ 1,55 m
14.15 Das Wasser beginnt am Boden der Röhre abzutropfen.

Das Untersuchungsergebnis der einzelnen Entnahmen zeigt die folgende Tabelle:

Zeit	ccm	Fluoresc.	Bact. prodig.
14.15—15.00	8,0	0,008	—
15.00—16.00	9,0	0,008	+
16.00—17.00	7,5	0,008	+ +
17.00—18.00	7,0	0,008	+ +
18.00—20.00	9,0	0,008	+ + +
20.00—22.00	8,0	0,008	+ + +
22.00— 8.00	18,0	0,008	+ + +
8.00—15.15	6,0	0,005	+ + +
15.15—16.30	12,0	0,003	+ + +
	84,5		

Aus diesen Versuchen geht zunächst hervor:

1. Der zu den Versuchen benützte Mainsand hat ein Porenvolumen von 35%, entsprechend ein Körner-

volumen von 65%. Es handelt sich um einen Boden, bei dem die Korngrößen über 1 mm zu rd. 60% vertreten sind. Die wasserhaltende Kraft des Bodens ist 10% seines Eigengewichtes bei etwa dreimal so großer Speicherfähigkeit.

2. Bei genügend weitem Zylinder wird die Filtration nicht durch die Zylinderwand gestört.

3. Der oben gekennzeichnete Mainsand ist in trokkenem Zustand in der Lage, mehrfache Wolkenbrüche mit 90 mm Niederschlagshöhe in einer 3 m hohen Schicht restlos zurückzuhalten.

Auch nach einem weiteren Wolkenbruch von 30 mm Niederschlagshöhe waren in das Grundwasser nicht nennenswerte Wassermengen abgeflossen, nur rd. 10% des Gesamtniederschlags.

4. Im Gegensatz zu feinporigen Profilen, wie sie Hofmann untersucht hat, bilden sich aber im Mainsand keine Wasserschichten, wobei die obere die untere vor sich herschiebt. Es treten Rinnsale auf, deren Weg spätere Niederschläge glatt durchlaufen. So kommen beim vierten Niederschlag von 30 mm nach 9 Stunden bereits die mit ihm eingebrachten Chloride und das Fluorescein heraus, obwohl nur die 10% des Gesamtniederschlages (= 71 ccm) in 16 Stunden abtropften.

Sobald das Profil einigermaßen durchfeuchtet ist, genügt aber die Niederschlagsmenge eines sehr starken Wolkenbruches, um das Wasser bis zu einer Tiefe von 2,40 m vordringen zu lassen; dabei hatten die aufgebrachten Keime bereits nach 7 Stunden die Höhe des Profils (= 2,40 m) durchwandert.

5. Für die Verunreinigung des Grundwassers ist somit die Anfeuchtung von Rinnsalen in gröberen Profilen ausschlaggebend für das rasche Vordringen neuer Niederschläge und damit eingeschwemmter Verunreinigungen.

6. Nach den eingangs angestellten Versuchen über die wasserhaltende Kraft des benutzten Sandes, wonach dieser 10% seines Eigengewichtes an Wasser in seinen Poren festhalten kann, müßten hier bei einer 3 m hohen Sandsäule 2633 g Wasser gehalten werden. Tatsächlich verblieben aber nur 570 ccm im Sand, dann begann bei weiterem Zufluß das Wasser bereits abzutropfen. Das beweist ebenfalls, daß sich nicht, wie bei feinporigen Profilen der Sand gleichmäßig von oben nach unten mit Wasser vollsaugt, sondern das Wasser in „Straßen" hindurchläuft und die daneben trocken gebliebenen Teile des Sandes erst ganz allmählich nach weiteren Wasserzugaben benetzt werden. Wenn auf diese Weise der Sand langsam stärker durchnäßt wird, vergrößern sich auch die

abfließenden Mengen, sie nähern sich mehr und mehr der Größe der zugegebenen, weil mit steigender Füllung der Poren immer geringere Mengen festgehalten werden.

3. Versuch:

Es sollte die Durchlässigkeit eines natürlichen Bodens, wie er im Gelände eines Wasserwerkes vorlag, geprüft werden. Bei Untersuchung des Grundwassers waren in diesem Gelände bereits einige Schächte senkrecht in das Erdreich bis zur Grundwasserzone gegraben worden, wodurch die Reihenfolge der einzelnen Erdschichten klar zutage trat. An einem dieser Schächte, an welchem der folgende Versuch unternommen wurde, zeigte sich folgendes Bodenprofil:

bis 0,5 m Tiefe Gartenerde,
0,5—1 m lehmige Erde,
1,0—1,5 m Kies mit Lehm durchsetzt,
1,5—2,0 m feiner Grubenkies,
unter 2,0 m grober Mainkais.

Die Ausmaße dieses Schachtes betrugen: 5 m Länge, 2,5 m Breite und 3,75 m Tiefe. Am Boden desselben war ein kleinerer, waagerecht verlaufender Seitenstollen gegraben worden, dessen Breite 50 cm, Höhe 30 cm und Länge 1,40 m betrug. Ebenso wie beim Hauptschacht waren dessen Seitenwände mit Brettern verschalt; die Decke bildete ein starkes Drahtsieb, welches das Herabfallen der Erde bzw. des Sandes verhinderte. Der senkrecht über dem Querschacht bis zur Erdoberfläche reichende Erdboden sollte nun auf seine Durchlässigkeit geprüft werden. Zu diesem Zweck wurde über dieser Erdschicht, also senkrecht über dem Querschacht, auf der Erdoberfläche eine halbkreisförmige Fläche abgesteckt, deren gerade Seite der Schachtwand nicht ganz anlag (Durchmesser des Halbkreises = 3 m).

Der Halbkreis, dessen Fläche 3,5 qm betrug, wurde zunächst mit einer Aufschwemmung von Bact. prodigiosum begossen und an den folgenden Tagen soviel Wasser aufgegeben, wie es den natürlichen täglichen Niederschlagsmengen eines regenreichen Monats entsprach. Als Beispiel wurde der Juli 1936 gewählt, dessen tägliche Regenmengen seiner zweiten Hälfte aufgegeben wurden. Das Wasser wurde gleichmäßig über die gane Fläche verteilt und je nach der Menge innerhalb ¼ bis 1 Stunde aufgegossen. Nachfolgende Tabelle enthält die einzelnen Tagesmengen.

mm	ccm	Tag	
5	= 17 662,5	8. 12. 37	
18	= 63 585,0	10. 12.	
1	= 3 532,0	12. 12.	1. Versuch
1	= 3 532,0	13. 12.	
12	= 42 390,0	14. 12.	
2	= 7 065,0	15. 12.	
18	= 63,585,0	16. 12.	
22	= 77 715,0	17. 12.	
2	= 7 065,0	18. 12.	

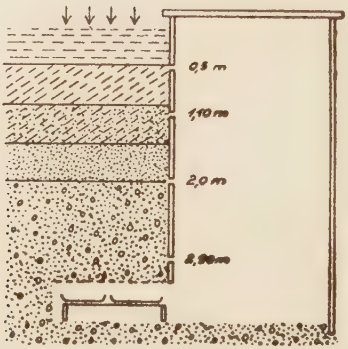
mm	ccm	Tag	
5	= 17 662,5	27. 12.	
18	= 63 585,0	29. 12.	2. Versuch
2	= 7 065,0	30. 12.	
12	= 42 390,0	31. 12.	
2	= 7 065,0	2. 1.	
18	= 63 585,0	3. 1.	
22	= 77 715,0	4. 1.	
2	= 7 065,0	5. 1.	

1. u. 2. Versuch
162 = 572 265,0

In dem Querstollen waren mehrere sterile Schalen aufgestellt, die das evtl. abtropfende Wasser auffangen sollten. Um das Vordringen des Wassers bzw. der Bakterien im Erdboden zu kontrollieren, wurden aus der Tiefe der Wand des Schachtes über dem Querstollen von Zeit zu Zeit Erdproben entnommen und auf ihren Gehalt an Bakterien untersucht. Die Bretterverschalung des Schachtes wurde hierzu an verschiedenen Stellen durchbohrt (siehe Tabelle) und mit 40 cm langen sterilen Röhren je eine Probe aus dem Erdreich entnommen. Drei Platinlöffel jeder Probe kamen in ca. 100 ccm alkalische Hefebrühe und wurden bei 22° einen Tag lang stehen gelassen, dann wurden von jeder Aussaat 2 ccm auf Agarplatten ausgespatelt und bei 22° bebrütet. Das Ergebnis der Untersuchungen zeigt die folgende Tabelle:

Datum	15.12.	20.12.	22.12.	27.12.	31.12.	6.1.	10.1.	14.2.	19.2
Entnahmestelle 1 = 0,5 m Tiefe	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Entnahmestelle 2 = 1,1 m „	+	+	+	–	–	+	+	–	–
Entnahmestelle 3 = 2,0 m „	–	–	–	–	–	+	–	–	–
Entnahmestelle 4 = 2,9 m „	–	+	–	–	–	–	–	–	–
Querstollen = 3,4 m „	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Folgende Skizze mag die Verhältnisse veranschaulichen:



Es zeigte sich also, daß das bakterienhaltige Wasser schon nach einem Niederschlag von insgesamt 37 mm (15. 12.) die Tiefe von 1,10 m erreicht hatte, dann aber trotz weiterer Wasserzufuhr offenbar nur langsam tiefer floß. Unterhalb der 2 m-Grenze konnte überhaupt nur einmal eine positive Probe gewonnen werden (20. XII.) und dabei war auf der Agarplatte dieser Probe nur eine einzige Kolonie gewachsen, während die Platten der aus den oberen Erdschichten stammenden Proben einen dichten roten Rasen zeigten.

Die Ursache für diese Erscheinung kann nur in den lehmhaltigen, oberen Erdschichten gesehen werden, die durch ihre Feinporigkeit wie ein Filter wirken. Man kann somit sagen, daß die überwältigende Zahl der Bakterien durch die lehmhaltigen Schichten zurückgehalten wird, was bei dem sonst sehr gut durchlässigen Sandboden, (vergl. Versuch 2 mit Mainsand), von ausschlaggebender Bedeutung für die Reinerhaltung des Grundwassers ist.

4. Versuch:

Benutzt wurde eine Glasröhre von 2,50 m Länge und einem Durchmesser von 9 cm. Die Röhre wurde von oben her bis zur Höhe von 2,35 m mit Erde gefüllt, und zwar in der Reihenfolge, wie sie im Profil des Bodens bei dem Naturschacht gelagert war (in natürlicher Feuchtigkeit).

0,15—0,5: Gartenerde,
1,0 —1,5: Kies mit Lehm durchsetzt,

1,0 —1,5: Kies mit Lehm durchsetzt,
1,5 —2,0: feiner Grubenkies,
2,0 —2,5: grober Mainkies.

Aufgegeben wurde eine Aufschwemmung von Bact. prodig. zusammen mit einer Anreicherung von Staphylokokkenphagen als Gemisch. In einem ccm dieser Lösung waren 10 Milliarden Keime enthalten.

Der Versuch wurde begonnen am 13. 3. 38 um 12 Uhr mit der Aufgabe von 150 ccm der genannten Lösung innerhalb 45 Minuten. An den folgenden Tagen wurde jeweils soviel Wasser nachgegossen, wie es der täglichen Niederschlagshöhe eines regenreichen Monats entsprach, natürlich umgerechnet auf die im Verhältnis zum Naturprofil benutzte Bodenoberfläche.

13. 3. 38	12.00	150	ccm	in	45	Min.	= 23 mm
15. 3.	16.00	130	ccm	„	30	„	= 20 mm
16. 3.	12.00	13	ccm	„	10	„	= 2 mm
17. 3.	11.00	76	ccm	„	30	„	= 12 mm
18. 3.	10.30	13	ccm	„	10	„	= 2 mm
19. 3.	11.0	115	ccm	„	30	„	= 18 mm
21. 3.	11.00	31	ccm	„	20	„	= 5 mm
22. 3.	11.00	31	ccm	„	20	„	= 5 mm
23. 3.	10.30	115	ccm	„	30	„	= 18 mm
24. 3.	11.00	13	ccm	„	10	„	= 2 mm
25. 3.	11.00	76	ccm	„	30	„	= 12 mm
28. 3.	12.00	115	ccm	„	30	„	= 18 mm
30. 3.	15.00	139	mm	„	60	„	= 22 mm
		1017	ccm				= 159 mm

Am 25. 3. tropften die ersten Wassermengen am Boden der Röhre ab. Es hatte also 10 Tage gedauert, bis das Wasser durch die 2,35 m dicke Erdschicht geflossen war.

Die täglich abgeflossenen Mengen wurden auf ihren Gehalt an Bakterien, sowie Bakteriophagen untersucht. Zum Nachweis der Bakterien wurden je 3 ccm des abtropfenden Wassers auf Agarplatten ausgespatelt und bei 22° bebrütet. Zum Nachweis der Phagen wurde der Rest der Flüssigkeit in alkalischer Hefebrühe, welcher 2 Tropfen einer Staphylokokkenaufschwemmung zugesetzt war, bei 22° einen Tag lang angereichert, dann filtriert und mit 4 verschiedenen Staphylokokkenstämmen austitriert.

Untersuchungsergebnis des täglich abgeflossenen Wassers.

25. 3.	10.00	25 ccm	Prodig. —	Phag —
26. 3.	13.00	20 ccm	„ —	„ —
27. 3.	11.00	24 ccm	„ —	„ —
28. 3.	10.00	35 ccm	„ —	„ —
29. 3.	10.00	15 ccm	„ —	„ —
30. 3.	10.00	35 ccm	„ —	„ —
31. 3.	11.00	35 ccm	„ —	„ —
1. 4.	11.00	40 ccm	„ —	„ —
2. 4.	11.00	53 ccm	„ —	„ —
4. 4.	11.00	45 ccm	„ —	„ —
6. 4.	16.00	11 ccm	„ —	„ —
		338 ccm		

Weder die Bakterien noch die Bakteriophagen waren also mit dem Wasser durch den Boden gelangt, was zweifellos auf die große Filterwirkung der oberen lehmhaltigen Schichten zurückzuführen ist.

Um nun festzustellen, bis zu welcher Tiefe die Bakterien bzw. die Bakteriophagen durchgedrungen waren, wurde die Glasröhre umgelegt und die Erde wieder schichtenweise unter sterilen Bedingungen aus ihr entfernt. Aus jeder Schicht wurden 2 Erdproben von je 3 Platinlöffeln entnommen, die Proben in alkalische Hefebrühe gegeben und 1 Tag bei 22° stehen gelassen. Jene, die zum Nachweis der Bakteriophagen dienen sollte, wurde mit Staphylokokken angereichert. Am folgenden Tage wurden 2 ccm Aufschwemmung auf Agarplatten ausgespatelt und bei 22° bebrütet, die Aufschwemmung der Phagen nach Filtration austitriert.

Bakterien fanden sich nur in den oberen Schichten bis zu einer Tiefe von 1,55 m, wie nach dem Ergebnis von Versuch 3 nicht anders zu erwarten war. Bakteriophagen konnten nirgends festgestellt werden.

1. Bei einem Naturprofil von 0,5 m Humus, 0,5 m lehmiger Erde und 0,5 m mit Lehm durchsetzten Kies erreichen die Niederschläge eines regenreichen Monas in tropfbar flüssiger Form ein Grundwasser in 3,45 m Tiefe, obwohl zwischen ihm und den feinporigen Schichten 2,25 m glatt durchlässige Kiese vorhanden waren.

2. Die natürlichen Niederschläge eines regenreichen Monats waren nicht imstande, eine aufgebrachte „Verunreinigung“ (Bact. prodig.) in nennenswerter Menge über 1,5 m einzuschwemmen. Nur je einmal gelang noch in 2 m bzw. 2,50 m Tiefe der Nachweis

der „Verunreinigung". Dies kann trotz aller Vorsichtsmaßregeln doch auf einem Versuchsfehler beruhen.

3. Die Nachahmung des Naturprofils in einem Versuchsprofil ergab keine wesentlichen Unterschiede gegenüber gewachsenem Boden, obwohl die Niederschlagsmenge rascher aufgebracht wurde.

a) Bakterien fanden sich nur bis 1,53 m Tiefe.

b) Nur rd. $^1/_{10}$ der aufgebrachten Niederschläge erreichten eine Tiefe von 2,35 m, obwohl ein seitliches Ausweichen — wie beim Naturprofil anzunehmen, ausgeschlossen war.

4. Eine flächenartig aufgebrachte Verunreinigung im Naturprofil verteilt sich nach den Seiten; dadurch verringert sich ebenfalls das lotrechte Vordringen in den Boden und die Gefahr der Erreichung des Grundwasserspiegels.

II. Die waagerechte Filtration.

Die Versuche über waagerechte Filtration, die nun folgen, unterscheiden sich von denen Bail und Breinle dadurch, daß sie nicht das Verhalten der Flüssigkeiten beim Durchfließen einer trockenen Bodenschicht zeigen, sondern in der Zone des Grundwassers durchgeführt werden. Die zu untersuchende Flüssigkeit wurde in einem im Experiment künstlich erzeugten Grundwasserstrom gegeben, worin sie mit der Geschwindigkeit des Stromes den Boden durchfloß.

Es wurde ein 5 m langer Holzkasten benützt, dessen Innenwände mit Zinkbleck ausgelegt waren. Der Kasten wurde mit Mainsand gefüllt. Durch einen bis auf den Boden reichenden Schlauch wurde langsam von unten her Wasser einströmen lassen, bis es 30 cm hoch im Sand aufgestiegen war, und dabei in diesem Bereich alle Luft aus dem Sand verdrängt hatte. Dieses in der unteren Sandschicht vorhandene Wasser kann mit einem natürlichen Grundwasser verglichen werden, welches auf einer undurchlässigen Bodenschicht ruht. An dem einen Ende des Kastens war die Querwand bis zu ihrer halben Höhe mit 48 kleinen Öffnungen versehen, durch die das Wasser ausfließen konnte. Die Öffnungen lagen reihenweise im Abstand von 8 cm übereinander und jede endete mit einem kleinen Gummischlauch, der mit einem kleinen Quetschhahn versehen war, sodaß man die Hähne so regulieren konnte, daß aus allen Öffnungen die gleiche Menge Wasser abfloß. Das Wasser jeder Reihe sammelte sich in einer Blechrinne, die unmittelbar unter den Öffnungen verlief. Auf diese Weise konnte das Wasser jeder Reihe gesondert abgeleitet werden, wodurch Absenkungen in verschiedener Grundwasserhöhe möglich waren. Wenn nun am anderen Ende des Kastens eben so viel Wasser zugeleitet wurde, wie insgesamt aus

allen Öffnungen abfloß, so entstand ein konstanter Strom, dieses sog. Grundwasser; und da die einregulierten Hähne überall gleichviel Wasser durchließen, mußte der Strom ein ganz gleichmäßiger sein, d. h. seine Geschwindigkeit war sowohl am Boden als auch in seinen mittleren und oberen Schichten die gleiche.

Durch die blecherne Querwand (W), die 15 cm über dem Boden endigte, war ein 20 cm breiter Raum abgeteilt, der nur im unteren Teil mit Wasser gefüllt war, wo er mit dem übrigen Kastenraum in Verbindung stand (s. Abb.). Da in ihm das Wasser in gleicher Höhe stand wie im Sande, trat in ihm der Wasserspiegel in 30 cm Höhe zutage. Durch eine solche Anordnung war es möglich, daß das zufließende Wasser direkt in den Grundwasserstrom gelangte ohne erst den Sand durchlaufen zu müssen. An der einen Längsseite des Kastens waren im Abstand von einem Meter 4 schmale, die ganze Wand senkrecht durchlaufende Glasfenster eingebaut, durch die man den Stand des Wassers beobachten konnte. Der ganze Apparat ruhte auf mehreren Holzkisten, von denen die auf der Seite des Ablaufs (hinten) liegenden etwas niedriger waren als die übrigen, wodurch der Kasten eine bestimmte Neigung bekam. Die Folge davon war, daß dem Wasserstrom je nach dem Grad der Neigung eine mehr oder weniger große Beschleunigung zuteil wurde. Je nachdem man viel oder wenig Wasser in der Zeiteinheit zu- und abfließen ließ, ergab sich für den Grundwasserspiegel ein größeres oder kleineres Gefälle und demnach für den Wasserstrom eine größere oder kleinere Geschwindigkeitkeit.

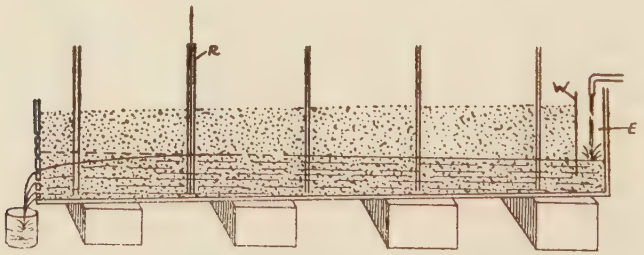


Abb. 2: Schematischer Längsschnitt durch den Sandkasten. Die Neigung ist der Deutlichkeit halber übertrieben groß gezeichnet. Die Abflußvorrichtung mit den Hähnen und Ablaufrinnen ist weggelassen. W = blecherne Querwand, E = Einlaufwanne, R = Grundwasserstand-Meßrohr mit Meßstange.

Um die Höhe des Grundwasserstandes überall genau beobachten zu können, wurden 5 lange Eisenrohre in den Sand eingegraben, in denen das Wasser frei aufsteigen konnte, da sie nicht mit Sand gefüllt waren. Die Höhe des Wasserstandes wurde nun so ermittelt, daß man einen langen Eisenstab mit Zentimetereinteilung in ein Rohr einführte, ihn

bis auf den Boden herabließ und nach dem Herausnehmen ablas, bis zu welcher Höhe er sich mit Wasser benetzt hatte.

Wenn der Apparat in Betrieb war, d. h. wenn Wasser in gleicher Menge zu- und abfloß, war der Wasserstand in den Rohren der Mitte immer etwas höher als in denen am Anfang und am Ende des Kastens, was erstens durch die Neigung des Kastens und zweitens durch die Absenkung des Wasserspiegels nach dem Ablauf zu zustande kam (s. Abb. 2).

Zunächst war es nötig, dem Wasserstrom eine Geschwindigkeit zu geben, die annähernd der eines natürlichen Grundwassers entsprach. Um die Geschwindigkeit bei einem bestehenden Wasserzu- und -abfluß zu ermitteln, brauchte man nur einen Farbstoff zuzugeben und abzuwarten, wann das gefärbte Wasser am Ende des Kastens abfließt. Dies hätte jedoch den Nachteil mit sich gebracht, daß ein großer Teil des Farbstoffes im Sand hängen geblieben wäre und diesen für spätere Versuche mit Farbstoffen unbrauchbar gemacht hätte. Es wurde deshalb versucht, die Geschwindigkeit durch Zufuhr von warmem Wasser festzustellen, indem dessen Vorrücken durch Thermoelemente, die hintereinander in den Sand gegraben wurden, beobachtet wurde. Das Ende jedes Elementes lag etwa 2—3 cm über dem Boden; die Lage der Elemente hintereinander war folgende:

1. 15 cm von der blechernen Querwand der Einlaufwanne entfernt
2. 80 cm „ „ „ „ „ „ „
3. 1,8 m „ „ „ „ „ „ „
4. 2,3 m „ „ „ „ „ „ „
5. 2,8 m „ „ „ „ „ „ „
6. 3,8 m „ „ „ „ „ „ „
7. 4,6 m „ „ „ „ „ „ „

1. Versuch:

Zu- und Ablauf wurden so einreguliert daß in der Minute 300 ccm Wasser zu- bzw. abflossen. Der Kasten war nach dem Ablauf zu um 2,5 cm geneigt. Von einem gewissen Zeitpunkt an wurde statt kalten warmes Wasser zugeleitet, welches aus einem Warmwasserbereiter mit einer Temperatur von ca. 50° C herausfloß. Da sich die ersten Mengen in dem Wasser der Zulaufwanne abgekühlt hätten, wurde diese gleichzeitig mit der Zuleitung von warmem Wasser durch einen Tauchsieder erwärmt. Sobald das Wasser 40° erreicht hatte, wurde der Tauchsieder entfernt. Das zufließende Wasser von 50° hielt von nun an das Wannenwasser auf einer Temperatur von 40°.

Zu Anfang des Versuches war die Temperatur auf allen Elementen 15°. Am 28. 5. 38 um 16 Uhr wurde warmes Wasser zugeleitet (300 ccm in der Minute). Den Verlauf des Versuches gibt die Tabelle 1 wieder:

Tabelle I.

	28. V.				29. V.			
	16.00	17.00	18.45	20.10	22.30	0.20*)	8.00	10.20
Element 1	15°	16,5	39	42	40	36	15	15
„ 2	15°	15	16,5	31	38	38	15	15
„ 3	15°	15	15	15	16,5	22,5	27,5	20
„ 4	15°	15	15	15	15	16,5	30	25
„ 5	15°	15	15	15	15	15	27,5	26
„ 6	15°	15	15	15	15	15	17,5	22
„ 7	15°	15	15	15	15	15	15	16,5

*) Um 0.20 (29. 5.) wurde das warme Wasser abgeschaltet und wieder kaltes zugeleitet.

Daraus ist zu ersehen, daß das Wasser rasch vorgerückt ist. Nach 8 Stunden hatte es bereits 2,3 m (Element 4) zurückgelegt. Nachdem das warme Wasser abgestellt (0,20) und wieder kaltes zugeleitet wurde, begann die Temperatur an den vorderen Elementen abzusinken, während sie an den hinteren später noch anstieg, weil das neu hinzukommende kalte Wasser das warme im Kasten vor sich herschob. 10.20 Uhr des nächsten Tages war am letzten Element eine Temperaturerhöhung festzustellen, während die 1. Elemente bereits wieder auf ihre Anfangstemperatur zurückgegangen waren. Das warme Wasser hatte demnach die 4,6 m lange Strecke in 18 Stunden und 20 Minuten durchflossen. Das entspricht einer Geschwindigkeit von mehr als 6 m in 24 Std., eine für einen Grundwasserstrom hohe Geschwindigkeit, wie sie sich aber auf Versuchsfeldern in den Mainalluvionen mehrfach ergab.

2. Versuch:

Es wurden diesmal statt 300 ccm in der Minute 150 ccm Wasser zulaufen lassen. Tabelle II zeigt den Verlauf.

Tabelle II.

	11. VI.					12. VI.				
	16.00	17.20	18.30	20.00	24.00	8.00	10.00	14.00	20.00	22.00
Element 1	13°	17,5	26	35	47,5	36	36	37	17,5	14
„ 2	14°	15	16	17,5	28	32	32	35	27,5	20
„ 3	14°	15	15	15	15	21	22,5	27,5	27,5	20
„ 4	14°	15	15	15	15	17,5	20	26	26	26
„ 5	14°	15	15	15	15	15	16,2	21	22,5	27,5
„ 6	14°	15	15	15	15	15	15	16,2	17,5	20
„ 7	14°	15	15	15	15	15	15	15	16,2	16,2

Diesmal war die Geschwindigkeit der Wärmequelle geringer. In 28 Stunden hatte das Wasser die 4,6 m durchflossen, das entspräche 3,94 m in 24 Std.

3. Versuch:

Der Zu- und Ablauf wurde diesmal bis auf 100 ccm Wasser pro Min. herabgesetzt.

Tabelle III.

	21. VI.					22. VI.								
	10.00	15.00	16.30	17.45	20.00	22.00	24.00	1.15	4.00	7.00	10.00	12.00	16.00	19.00
Element 1	16°	27,5	30	30	30	30	30	32	32	32	34	30	32,5	32,5
„ 2	16°	16	17,5	20	22	22,5	25	27,5	27,5	27,5	30	27,5	30	30
„ 3	16°	16	16	16	16	16	18	18	18	20	20	20	22	22
„ 4	16°	16	16	16	16	16	18	18	18	18	18	18	20	21
„ 5	16°	16	16	16	16	16	18	18	18	18	18	18	18	18
„ 6	16°	16	16	16	16	16	18	18	18	18	18	18	18	18
„ 7	16°	16	16	16	16	16	18	18	18	18	18	18	18	08

	23. VI.				24. VI.			25. VI.	
	1.00	11.00	19.00	23.00	10.00	17.00	23.30	8.00	17.00
Element 1	36	37	37,5	36	37,5	26	18	15	15
„ 2	30	31	30	31	32	30	22,5	17,5	17,5
„ 3	22,5	25	27,5	24,5	26	26	25	22.5	22
„ 4	21,5	22,5	27,5	22,5	25	25	22,5	22,5	22
„ 5	20	22	22	22	22,5	22,5	22,5	22	22
„ 6	18	19	19	19	21,5	22	18	20,5	20
„ 7	18	19	19	19	20	21	20	18	20

*) Am 24. VI. 10 Uhr wurde das warme Wasser abgestellt und kaltes weiterlaufen gelassen.

Wie die Tabelle III zeigt, war das warme Wasser noch langsamer vorwärts gelangt als im vorhergehenden Versuch. Erst am 4. Tag (72 Std. nach Beginn) war es bei Element 7 angelangt. Aus der Tabelle ist zu ersehen, daß vom 3. Element ab, trotz der langen Dauer des Versuches keines mehr die hohen Temperaturen erreichte, wie sie bei den ersten beiden Elementen auftraten, was nichts anderes bedeutet, als daß sich das warme Wasser auf seinem Weg durch den Sand abgekühlt hat. Auch wenn fortwährend heißes Wasser zufließt, wird die Temperaturerhöhung in der zweiten Weghälfte immer nur gering sein.

Die ganz zu Anfang zugeflossenen Wassermengen werden sich bei dem langsamen Vorrücken wahrscheinlich soweit abgekühlt haben, daß das Thermoelement gar keine Erhöhung der Temperatur mehr anzeigt, wenn sie mit ihm in Berührung kamen. Ein weiterer Versuch, der unter denselben Bedingungen wie der eben geschilderte angestellt wurde, zeigte das gleiche Ergebnis.

4. Versuch:

Zu- und Ablauf 100 ccm Wasser in der Minute. Neigung des Kastens nach dem Abfluß zu 2,5 cm. Höhe des Wasesrstandes in den Meßrohren in der Reihenfolge vom Ablauf nach dem Einlauf zu:

30,5*) 33 32,5 32,5 31 29 (Einlaufwanne)

Der Versuch wurde begonnen am 28. 6. 38 um 11.00 Uhr mit der Zugabe von einem Liter einer Fluorescein-Kochsalzlösung. In einem Liter dest. Wasser waren 1 g Fluorescein und 50 g Kochsalz gelöst. Die Lösung wurde langsam innerhalb ¼ Stunde zugegossen. Durch die reihenweise Anordnung der Abflußöffnungen war es möglich, den Wasserstrom in verschiedenen Wasserschichten zu untersuchen. In vorliegendem Versuch, wo das Wasser aus den 4 unteren Reihen austrat, wurde der Grundwasserstrom in 4 übereinanderliegenden Schichten unterteilt, von denen das Wasser einer jeden durch die ableitenden Blechrinnen gesondert aufgefangen und untersucht werden konnte. Das Ergebnis zeigt die folgende Tabelle. Darauf sind die Entnahmereihen von unten nach oben nummeriert. Das Kochsalz wurde durch Titration mit Silbernitrat festgestellt, 42 mg/l ist der Ausgangswert des Durchflußwassers.

	Reihe	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	Zeit	mg/l Nacl'				mg/l Fluoresc.			
29. VI.	7.00	249	42	42	42	>1	0,003	—	—
	7.30	224	42	42	42	>1*	0,02	—	—
	8.00	308	42	42	42	>1*	0,1	—	—
	8.30	326	42	42	42	>1*	0,2	—	—
	9.00	434	42	42	42	>1*	0,25	—	—
	9.30	630	42	42	42	>1*	0,3	0,002	0,002
	10.00	728	70	42	42	>1*	1,0	0,05	?
	11.00	951	112	56	42	>1*	1,5	0,5	?
	12.00	1547	169	56	42	>1*	1,5	1,0	—
	13.00	1349	340	70	42	>1*	1,5	1.0	?
	14.00	1315	535	70	42	>1*	>1	1	0,005
	15.00	1280	603	84	42	>1*	>1*	1,1	?
	16.00	1295	675	98	42	>1*	>1*	>1	—
	17.00	1220	675	98	42	>1*	>1*	>1*	?
	19.00	955	560	139	42	>1*	>1*	>1*	—

*) Die Absenkung infolge Entnahme.

Anmerkung: Die Zahlen sind ungenau, weil die Bodenfläche des Kastens infolge der Belastung etwas durchhängt. Über die hydrotechnischen Fragen bei diesen Versuchen wird das Bayrische Landesamt für Wasserversorgung genauere Untersuchungen anstellen.

	Reihe	I	II	III	IV	I	II	III	IV
	Zeit	mg/l Nacl'				mg/l Fluoresc.			
	21.00	830	385	205	42	>1*	>1*	>1*	0,001
	23.00	426	280	245	42	>1*	>1*	>1*	0,2
30. VI.	2.00	309	175	213	70	>1*	>1*	>1*	1,0
	5 00	135	135	209	112	>1*	>1*	>1*	>1
	8.00	135	104	135	209	>1**	>1**	> 1***	>1*
	11.00	104	104	104	104	>1**	>1**	>1**	>1***
	13.00	104	104	104	135	1,0	1,0	1,0	>1***
	15.00	104	104	104	104	1	1	1	1
	18.00	70	104	70	104	1	1	1	1
	21.00	70	70	70	70	1	1	1	1
	24.00	56	69	69	69	0,5	0,5	1	1
1. VII.	3.00	56	56	56	56	0,25	0,25	0,7	1
	7.00	42	42	42	42	0,2	0,2	0,2	0.5
	10.00	42	42	42	42	0,2	0,2	0,2	0,5
	13.00	42	42	42	42	0,2	0,2	0,2	0,6
	16.00	42	42	42	42	0,2	0,2	0,2	1,0
	18.00	42	42	42	42	0,2	0,2	0,2	0,7
	24.00	42	42	42	42	0.2	0,2	0,2	0,5
2. VII.	7.00	42	42	42	42	0,05	0,05	0,05	0,2
	12.00	42	42	42	42	0,05	0,05	0,05	0,2
	18.00	42	42	42	42	0,05	0,02	0,02	0,2
	22.00	42	42	42	42	0,1	0,05	0,05	0,2
3. VII.	10.00	42	42	42	42	0,05	0,05	0,05	0,1
	23.00	42	42	42	42	0,05	0,02	0,02	0,1
4. VII.	9.00	42	42	42	42	0,02	0,02	0,02	0,05
	16.00					0,02	0,02	0,02	0,02
5. VII.	11.00					0,02	0,02	0,02	0,02
	23.30					0,02	0,02	0,02	0,02
6. VII.	10.00					0,01	0,01	0,01	0,01
7. VII.	12.00					0,01	0,01	0,01	0,01
9. VII.	7.00					0,002	0,002	0,002	0,002
	18.00					—	—	—	—
10. VII.	12.00					—	—	—	—

Als am folgenden Tag nach Beginn des Versuches morgens 7 Uhr mit der Untersuchung des abfließenden Wassers begonnen wurde, zeigte es sich, daß sowohl das Kochsalz als auch das Fluorescein aus der un-

*) größer als der vorhergehende Wert.
**) kleiner als der vorhergehende Wert.
***) gleich dem vorhergehenden Wert.

teren Reihe (I) schon abfloß. In weniger als 20 Std. also hatte die Lösung den Sand durchflossen, denn die Konzentration war bereits auf 249 mg/l angestiegen, woraus zu entnehmen war, daß der Beginn des Abflusses schon einige Zeit zurücklag.

In der II. Reihe war noch kein Na Cl festzustellen, wohl aber war Fluorescein vorhanden. Wie auch später auf Reihe III und IV zu sehen ist, eilte das Fluorescein dem Kochsalz immer etwas voran und erschien deshalb früher im Ausfluß.

Wenn man die Konzentration der einzelnen Reihen weiter verfolgt, so erkennt man, daß sie sowohl für Na Cl wie für Fluorescein allmählich ansteigt, um dann wieder stetig abzufallen. Dies geschieht in der Reihenfolge der Schichten von unten nach oben. Das NaCl ist genau nach 2 Tagen ganz abgelaufen, die Untersuchung der einzelnen Schichten ergibt wieder den Normalwert des Wassers für Kochsalz. Das Fluorescein hielt sich demgegenüber auffallend lange im Sand.

5. Versuch.

Zu- und Ablauf 100 ccm Wasser in der Minute. Neigung des Kastens 2.5 cm. Die Höhe des Wasserstandes

30,5 33 33 32,5 30,5 29 (Wanne)

Es wurde eine Kochsalz-Fluoresceinlösung zugeführt, diesmal aber nicht in den Einlaufschacht, sondern in den Sand selbst. 30 cm vom Einlaufschacht entfernt wurde ein Eisenrohr 20 cm tief in den Sand vorgeschoben und 1 Liter der Lösung innerhalb ½ Stunde eingeschüttet, danach noch 1 Liter Wasser nachgegossen. Die Lösung enthielt auf 1 Liter dest. Wassers 50 g Na Cl und 0,5 g Fluorescein. Eingabe am 12. 7. 38 um 19 Uhr.

Der Versuch ergab im wesentlichen das Gleiche wie der vorhergehende. Wieder erschien das Kochsalz und das Fluorescein zuerst in der untersten Entnahmereiho, und zwar 17 Stunden nach der Eingabe. Der kurze senkrechte Weg, den die Flüssigkeit erst nehmen mußte, um in das Grundwasser zu gelangen, war ohne merkbaren Einfluß gewesen. Quantitativ, jedoch nicht qualitativ abweichend vom vorangehenden Versuch verhielt sich die Konzentration der beiden Stoffe. In der untersten Schicht erreichte die Konzentration für Na Cl etwas höhere Wert als im Versuch 5. In den oberen drei Schichten dagegen blieb sie bedeutend niedriger und hielt weniger lange an.

Um eine Kontrolle darüber zu haben, ob auch alles Kochsalz den Sand verlassen hat, wurden an verschiedenen Stellen des Sandes Proben aus der obersten Grundwasserzone und der kapillaren Ansaugzone entnommen und auf ihren Gehalt an Na Cl geprüft. Es konnte nur der Ausgangswert des Wassers festgestellt werden.

6. Versuch.

Zu- und Ablauf 100 ccm Wasesr in der Minute. Grundwasserstand:

30 32 32 31 30 28,5 (Wanne)

Diesmal wurde eine Aufschwemmung von Bact. prodig. in den Zulauf gegeben und zwar 100 ccm. In einem ccm der Aufschwemmung waren 5,7 Milliarden Keime enthalten. Die Untersuchung der abfließenden Menge wurde so vorgenommen, daß von je einem ccm einer Entnahmereihe eine Agarplatte gegossen wurde.

Am 28. 7. 38 Eingabe von 100 ccm Aufschwemmung (13 Uhr). Die Zahlen der folgenden Tabelle bedeuten aufgegangene Kolonien.

		I	II	III	IV
9. VII.	6.00	—	—	—	—
	7.00	1	1	—	—
	8.00	22	1	—	—
	9.00	52	5	—	—
	10.00	150	105	—	—
	11.00	131	130	—	—
	12.00	191	197	—	—
	13.00	600	180	5	—
	15.00	559	160	34	—
	16.00	583	266	54	—
	17.00	74	50	26	—
	18.00	435	981	26	—
	20.00	190	200	13	—
	21.00	500	405	50	—
	23.00	440	600	82	—
10. VII.	1.00	500	500	100	—
	4.00	520	500	110	6
	7.00	520	515	400	20
	9.00	400	390	100	30
	11.00	425	407	137	35
	13.00	129	391	104	18
	16.00	416	220	2	6
	19.00	390	325	214	10
	22.00	311	400	182	10
11. VII.	1.00	300	316	200	10

III. Versuche über lotrechte Filtration bei Porenvolumen = Wasservolumen.

Versuchsanordnung:

Eine 3,3 m lange Röhre von 9,0 cm Durchmesser wurde 20—30 cm hoch mit Wasser gefüllt und dann von oben her der Sand eingegeben, sodaß er sich im Wasser aufschichtete und keine Luft zwischen seinen Teilchen verbleiben konnte. War soviel Sand zugeschüttet, daß das vorher eingegebene Wasser verbraucht war, so wurde wieder eine Menge Wasser nachgeschüttet und sogleich der Sand nachgefüllt. Dies wurde fortgesetzt bis die Sandsäule eine Höhe von 3 m erreicht hatte. Durch ein solches Vorgehen wurde verhindert, daß die im Wasser vorhandenen abschlämmbaren Teilchen sich als Schicht absetzen konnten.

Auf dieses Profil wurden nun durch ein Überlaufgefäß 100 ccm Wasser/Min. gegeben und entsprechend am Boden der Röhre ein Ausfluß von 100 ccm durch einen verstellbaren Quetschhahn ermöglicht. Der Sand wurde also von einem gleichmäßigen Wasserstrom von bestimmter Geschwindigkeit durchflossen. Um die Filterwirkung des Sandes bei derartigen Verhältnissen zu prüfen, wurde zu einem bestimmten Zeitpunkt eine Fluorescein-Kochsalzlösung, der der 1 ccm einer Aufschwemmung von Bact. prodigiosum zugesetzt war, aufgegeben. Die Lösung enthielt 36 mg Fluorescein, 1,82 g NaCl und einen ccm Prodigiosum-Aufschwemmung = rd. 10 Milliarden Keime.

Verlauf: Eingabe der Lösung am 22. 4. 39. 16,00 Uhr.

Entnahme- und Untersuchungsergebnis:

Zeit	mg/NaCl	mg/Fluor.	Keime im ccm
17.00	27,0	0,003	15
17.10	191,0	>1	164
17.15	637,7	>1*	332
17.20	811,6	>1*	329
17.25	1217,4	>1***	193
17.30	289,9	>1***	143
17.35	208,8	>1**	57
17.40	208,8	>1**	27
17.45	150,8	>1**	20
17.50	27,0	1	17
17.55	40,0	1	12
18.00	27,0	1	16
18.10	27,0	1	17

Zeit	mg/NaCl	mg/Fluor.	im ccm
18.20	27,0	0,3	5
18.30	27,0	0,3	8
18.40	27,0	0,3	4
18.50	27,0	0,3	6
19.00	27,0	0,3	6
19.15	27,0	0,2	8
19.30	27.0	0,05	7
19.45	27,0	0,05	4
20.00	27,0	0,025	4
20.20	27,0	0,025	4
20.40	27,0	0,01	6
21.00	27,0	0,01	4
21.20	27,0	0,01	4
21.40	27,0	0,01	5
22.00	27,0	0,005	8
22.30	27,0	0,005	6
23.00	27,0	0,005	2
23.30	27,0	0,005	1
24.00	27,0	0,004	4
23. 4. 1.00	27,0	0,004	3
2.00	27,0	0,004	—
8.00	27,0	0,001	—
10.00	27,0	0,001	1
12.00	27,0	0,001	—
16.00	27,0	Spur	—
24. 4. 8.00	27,0	—	—

Da der benutzte Sand ein Porenvolumen von 35% besitzt, ist der Raum für das Wasser in der drei Meter langen Röhre 6676,95 ccm groß. Wenn 100 ccm Wasser in der Minute zu- und abfließen, muß die Wassermenge von 6676,95 ccm in einer Stunde und 7 Minuten den Sand durchlaufen haben. Ob dabei in dieser Zeit gelöste Stoffe oder Bakterien von dem Wasser durch die 3 m starke Sandschicht mitgeführt werden, hängt von der Filtrierkraft des Sandes ab. Wie der vorliegende Versuch zeigte, waren sowohl das Fluorescein als auch die Bakterien bereits eine Stunde nach Eingabe der Lösung im Ausfluß erschienen. Der Sand hatte also keine qualitative hemmende Wirkung ausgeübt. Die Tatsache, daß das Kochsalz bereits 45 Min. nach seinem Auftreten am Ausfluß vollständig ausgespült war, beweist, daß der Mainsand, wenn seine Poren vollständig mit Wasser gespeichert sind, das Salz nicht zurückzuhalten vermag. Selbst ein Teil der Bakterien

wird nicht festgehalten, sie waren nach einer Stunde im abfließenden Wasser vereinzelt feststellbar.

Gegenüber NaCl halten sich Fluorescein und Bakterien längere Zeit im Sand*).

Filtrationsversuch mit Kochsalz und Fluorescein im Mainsand bei Porenvolumen = Wasservolumen ohne Wasserzu- und Ablauf.

Versuchsanordnung: 3 m hohe mit Mainsand gefüllte Glasröhre. Porenvolumen vollständig mit Wasser gefüllt. Wasserstau über dem Sand 1 cm.

Verlauf: Am 30. IV. 39 eingegeben 500 ccm einer Fluorescein-Kochsalzlösung (150 g NaCl und 100 mg Fluorescein). 15 Uhr.

	16.00	Fluorescein	sichtbar	bis	0,40	m Tiefe
	18.00	„	„	„	1	„ „
	23.00	„	„	„	1,5	„ „
1. V.	11.00	„	„	„	2,0	„ „
	20.00	„	„	„	?	„ „
2. V.	8.00	„	„	„	2,6	„ „

Um 11.00, 20.00 und 8.00 wurden jeweils 20 ccm Wasesr am Boden der Röhre abgelassen, um festzustellen, ob durch das Glas nicht sichtbare Mengen Fluorescin bzw. NaCl den Boden erreicht hatten. Ein positives Ergebnis ergab sich nur bei 8.00 Uhr sowohl für Kochsalz als auch für Fluorescein.

Es waren also rd. 40 Stunden vergangen, bis die Lösung durch die 3 m starke Sandschicht gelangt war.

Während des Versuches, besonders anfangs nach der Eingabe der Lösung konnte beobachtet werden, wie in der über dem Sand stehenden Flüssigkeitssäule Strömungen von unten nach oben und umgekehrt entstanden.

Zur Erklärung dieses Vorganges muß man annehmen, daß das Kochsalz entsprechend seiner spez. Schwere das Bestreben hat, in dem Was-

*) Berechnung der ausgespülten NaCl-Menge:
Gesamte titrierte Milligramme 3779,1
Abzügl. Trinkwasser-Wert 270,0 = 3509,1 mg NaCl.
Durchschnittswert für 10 Entnahmen demnach 350,9 mg NaCl.
Von 17.10 bis 17.55 Uhr waren 4,5 Liter Wasser durch die Röhre geflossen. Es ergibt demnach das Produkt 350,91 × 4,5 die Gesamtmenge der ausgespülten NaCl Milligramme = 1579,09.
Eingegeben waren 1820 mg NaCl. Dieser Unterschied mag auf der Ungenauigkeit der Titrationsmethode beruhen, so daß man bestimmt annehmen kann, daß alles Kochsalz abgeflossen ist, zumal alle späteren Entnahmen keinen höheren Wert ergaben als den für das gewöhnliche Leitungswasser.

ser herabzusinken und dabei seine hohe Konzentration bei der Berührung mit klarem Wasser auszugleichen. Der Vorgang des Tiefertretens wird natürlich — wie der Versuch zeigt — zuerst dort einsetzen, wo die größere Menge von Kochsalzmolekülen auf der Grenzfläche zwischen Lösung und klarem Wasser lastet, d. i. an der Stelle, wo die Oberfläche des Sandes etwas vertieft ist, über der eine etwas höhere Flüssigkeitssäule steht als an benachbarten erhöhten Stellen. Es ist klar und auch aus dem Verlauf des Versuches ersichtlich, daß anfangs, wo die Konzentration der Lösung noch sehr hoch ist, die Geschwindigkeit des Tiefertretens größer ist als später, weil sich dann die Konzentration immer mehr verringert. Maßgebend für diese Erscheinung mag von den beiden Stoffen wohl das NaCl sein, während das Fluorescein nur passiv mitgerissen wird.

C. Zusammenfassung.

1. Die vorliegenden Versuche ergaben, daß ein Grundwasser in Mainsandschichten besonders stark der Gefahr ausgesetzt ist, verunreinigt zu werden. Die Korngröße des Mainsandes ist nicht fein genug, um als ein wirksames Filter in den das Grundwasser überdeckenden Profilen zu wirken. Ein einmaliger starker Niederschlag von 33 mm auf t r o c k e n e m Sand genügt, um das Wasser in 24 Stunden bis zu 2,25 m Tiefe eindringen zu lassen. Folgen diesem ersten Guß in den folgenden Tagen noch ein bis zwei weitere von gleicher Stärke, so ist die Tiefe von 3 Meter erreicht, d. h. das Oberflächenwasser ist in dem Bereich angelangt, in dem sich in den Mainalluvionen fast stets der Grundwasserspiegel vorfindet.

2. Die Verhältnisse verschlechtern sich mit zunehmender Durchfeuchtung. Dann bewegt sich das Niederschlagswasser weniger nach den Seiten, sondern läuft senkrecht in den angefeuchteten Rinnsalen schnell durch. Gelöste und ungelöste Stoffe werden dabei mit in die Tiefe genommen.

3. Völlig durchfeuchtete Profile (Hochwasser) sind besonders gefährlich. Gelöste Stoffe wie Kochsalz kommen fast restlos in das Grundwasser, leicht adsorbierbare Stoffe wie Fluorescein werden zwar länger festgehalten, schließlich aber auch durchgeschwemmt.

Bakterien gehen genau so schnell wie die gelösten Stoffe durch, erleiden aber eine starke quantitative Einbuße.

4. Neben der Trockenheit und der Mächtigkeit des Profils kommt als Schutz des Grundwassers die Überdeckung durch Humus, Löß, Lehm und Mergel in Frage. Bei natürlichen Niederschlagsverhältnissen lassen sie nur ganz vereinzelte Keime hindurch. Profile über 1,5 m können ungelöste Stoffe wie Bakteriengüsse wohl nie überwinden.

Auch örtlich beschränkte Verunreinigungen (wie z. B. Jauche) erfahren so eine größere flächenhafte Ausdehnung; damit ist die Gefahr des lotrechten Vordringens erheblich eingeschränkt.

Die Bewirtschaftung mit tiefer wurzelnden Pflanzen beseitigt also diesen einzigen Schutz der Mainalluvionen und ist zu unterlassen.

5. Die waagerechte Filtration beim seitlichen Vordringen des Grundwassers ist im allgemeinen nicht so wirksam wie die senkrechte. Ganz besonders macht sich das bei Mainsand bemerkbar.

Die mit Kochsalz und Fluorescein angestellten Versuche im Laboratorium veranschaulichen, wie sich der Vorgang abspielt, wenn eine Verunreinigung in den Grundwasserstrom gerät und von diesem weitergetragen wird. Der mit Kochsalz und Fluorescein-Lösung versetzte Teil der Grundwasserschicht wird von dem nachdringenden Wasser in der Strömungsrichtung vorwärts geschoben, bis er am Ausfluß erscheint. Dabei zeigte sich, daß nicht, wie man hätte erwarten können, das spezifisch schwere Kochsalz sich dem Fluorescein unterschichtete, sondern die Mischung der beiden Stoffe beibehalten wurde und die beiden Stoffe auch sonst gleiches Verhalten zeigten.

6. Verunreinigtes Wasser kommt zuerst am Boden der Grundwasserzone zum Abfluß, zuletzt erst in den obersten Lagen. Die Konzentration der beiden Stoffe stieg in den einzelnen Entnahmezonen nacheinander in der Reihenfolge von unten nach oben an, um dann wieder in gleicher Weise abzufallen, wobei die Stärke und Dauer der erlangten Konzentration ebenfalls in der Reihenfolge von unten nach oben abnahm.

7. Entsprechend verhielt es sich merkwürdigerweise beim Bakterienversuch. Sie wurden ebenso rasch durch den Sand befördert wie Kochsalz und Fluorescein. Die Filterwirkung, gemessen an der durchgegangenen Bakterienzahl, ist wegen der maximalen Durchfeuchtung des Bodens erheblich schlechter als in lotrechter Richtung.

8. Ist eine Verunreinigung in das Grundwasser gelangt, so kann die Weiterverbreitung durch die Grundwasserströmung bei derartigen Bodenverhältnissen bei Bakterien nur quantitativ beschränkt werden.

9. Daraus ergibt sich, daß die Schutzzonenfrage in der Trinkwasserhygiene nach den bisher aufgestellten Grundsätzen (Knorr, M., Die Schutzzonenfrage in der Trinkwasserhygiene) beibehalten werden muß. Die erhobenen Forderungen können nicht abgeändert werden, sondern sind für Mainalluvionen noch zu verschärfen.

Zum Schlusse meiner Arbeit danke ich Herrn Prof. Dr. Knorr für die freundlichen Überlassung des Themas, seine guten Ratschläge und die stets bereite Hilfe bei der Durchführung der Arbeit.

Schrifttum.

Bail u. Breinl: Versuche über das seitliche Vordringen von Verunreinigungen im Boden, Arch. f. Hyg. 82, 33 (1914).

Brix-Gerlach: Die Wasserversorgung, Verlag Oldenbourg, München 1936.

Gärtner, A.: Hygiene des Wassers, Verlag Vieweg, Braunschweig, 1915.

Hofmann, F.: Grundwasser und Bodenfeuchtigkeit, Arch. f. Hyg. 1, 41, 1883.

— Über das Eindringen von Verunreinigungen in Boden und Grundwasser, Arch. f. Hyg. 2, 145, 1884.

Lehmann, K. B.: Vier Gutachten über Wasserversorgungsanlage W., Verhandl. der physik.-medizin. Ges. Würzburg, Bd. XXXIII, 1900.

Knorr, M.: Die Schutzzonenfrage in der Trinkwasserhygiene, Gas- und Wasserfach, 1937, 330/350.

Braun: Inauguraldissertation, Würzburg 1930.

Lebenslauf.

Am 8. August 1913 wurde ich in Gräfenthal i. Thür. als Sohn des staatl. gepr. Dentisten Julius Muselmann geboren. Nach vierjährigem Besuch der Volksschule trat ich in die Mittelschule meines Heimatortes ein, die ich bis zum 14. Lebensjahr besuchte. Dann war ich Schüler der Oberrealschule in Rudolstadt i. Thür. Im Herbst 1933 legte ich die Reifeprüfung ab. Im November des gleichen Jahres begann ich das Studium der Medizin in Jena, wo ich drei Semester verblieb. Nach weiteren zwei Semestern an der Bonner Universität legte ich mein Physikum ab. Den klinischen Teil meine Studiums verbrachte ich in Würzburg. Im März 1939 legte ich hier die medizinische Staatsprübung ab.

Ehrenwörtliche Versicherung.

Ich versichere hiermit ehrenwörtlich, daß ich außer dem angegebenen Schrifttum keine anderen Hilfsmittel benutzt habe.

Rudolf Muselmann.